ÉLÉMENTS DE PHYSIQUE TERRESTRE ET DE MÉTÉOROLOGIE

Antoine César Becquerel,
Alexandre Edmond Becquerel



ÉLEMENTS
DE PHYSIQUE
TERRESTRE
ET
DE MÉTÉOROLOGIE.

PARIS
TYPOGRAPHIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES
RUE JACOB, 56

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE
TERRESTRE
ET
DE MÉTÉOROLOGIE

PAR M. BECQUEREL,
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE L'INSTITUT DE FRANCE
ET PROFESSEUR ADMINISTRATEUR DU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, ETC.,

ET

PAR M. ED. BECQUEREL,
AIDE NATURALISTE AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, ETC.

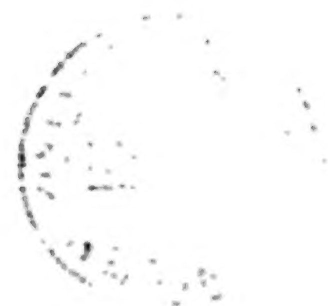




PARIS,
LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES,
IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, 56.

1847.





AVANT-PROPOS.

Les éléments de physique terrestre et de météorologie que nous présentons au public ont servi de texte au cours de physique appliquée qui a été fait l'année dernière au Muséum d'histoire naturelle. Cette partie de la physique est sans aucun doute celle qui offre le plus de difficulté, en raison du très-grand nombre de faits qui la composent et du peu de lois découvertes jusqu'ici, servant à établir leurs relations. Un traité complet sur la matière eût présenté de trop grandes difficultés dans l'état actuel de la science.

L'accueil favorable fait à ce cours par le public, et la demande réitérée qui nous a été faite par la plupart des personnes qui l'ont suivi, d'en livrer le texte à l'impression, nous ont engagé à nous rendre à leur désir, tout en ne nous dissimulant pas que, malgré tous nos soins à rassembler les nombreux matériaux qui le composent, à les coordonner et à en discuter la valeur, l'ouvrage présenterait encore bien des lacunes qui sont presque inévitables dans une réunion d'éléments aussi divers.

D'un autre côté, nous ne prétendons nullement offrir au public un ouvrage entièrement original, puisque nous avons fait de nombreux

emprunts aux personnes qui se sont le plus occupées de physique terrestre et de météorologie, et en tête desquelles nous placerons MM. ARAGO, BOUSSINGAULT, DUPERREY, ÉLIE DE BEAUMONT, DE GASPARIN, DE HUMBOLDT, KAEMTZ, DE SAUSSURE, etc. Néanmoins, quelques parties ont été traitées sous un point de vue nouveau; nous citerons particulièrement les phénomènes de décomposition et de recomposition qui ont lieu sans cesse à la surface de la terre.

Nous avons mis tous nos soins à rapporter avec exactitude les nombreuses données numériques composant les tableaux qui accompagnent la description des phénomènes : il pourrait se faire cependant que des erreurs s'y fussent glissées; dans ce cas, nous prierions le lecteur de vouloir bien nous les indiquer, afin de donner un erratum s'il était nécessaire.

On sera peut-être étonné de trouver dans notre ouvrage beaucoup d'applications aux différentes branches des sciences naturelles ; mais il ne pouvait en être autrement dans un traité qui est le résumé d'un cours de physique terrestre et de météorologie professé au Jardin-des-Plantes, où l'on doit s'efforcer de montrer l'intervention des forces physiques dans la production des phénomènes naturels et de présenter pour ainsi dire un tableau de la philosophie naturelle.

INTRODUCTION.



Les éléments matériels et les agents impondérables qui sont intervenus dans la formation de la terre et dans celle des corps qui recouvrent sa surface, existent également dans les espaces célestes; mais d'où viennent-ils, comment ont-ils agi pour constituer notre globe? Telles sont les questions qui vont d'abord nous occuper.

Si l'on jette les yeux sur le ciel pour étudier les astres qui y sont répandus avec tant de profusion, on voit d'abord des étoiles fixes, et plus près de nous les corps de notre système planétaire, circulant autour du soleil. Mais si l'observateur est muni d'un puissant télescope, qui lui permette d'explorer les régions les plus éloignées, il aperçoit, indépendamment d'un nombre beaucoup plus considérable d'étoiles, des multitudes de nébuleuses de formes diverses, et la voûte céleste apparaît comme un immense océan parsemé d'îles et d'archipels, dans lequel nous allons essayer de pénétrer, afin de remonter aux causes qui ont concouru à la formation du globe terrestre.

Le système solaire, tel qu'il est connu aujourd'hui, se compose de treize planètes et de leurs satellites, de plusieurs centaines de comètes, et, en outre, de myriades d'aérolithes, de bolides et d'étoiles filantes. On doit peut-être y comprendre une zone de matière nébuleuse à laquelle on rapporte la lumière zodiacale, mais dont l'existence est encore problématique.

Les planètes décrivent autour du soleil, d'occident en orient, des orbes elliptiques, en général peu allongés, dont cet astre occupe un des foyers et dont les plans sont la plupart peu inclinés à l'écliptique. Chacune d'elles est animée en outre d'un mouvement de rotation autour d'un axe ayant une direction lentement variable.

Les treize planètes, classées d'après leur distance au soleil, sont : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Vesta, Astrée, Junon, Cérès, Pallas, Jupiter, Saturne, Uranus et la nouvelle planète Le Verrier.

Les cinq planètes situées entre Mars et Jupiter sont très-petites; elles ont été découvertes à l'aide du télescope depuis le commencement de ce siècle.

Le tableau ci-joint renferme quelques éléments relatifs au soleil et aux planètes.

ASTRES.	DIAMÈTRE MOYEN rapporté à celui de la terre.	VOLUME rapporté à la terre.	MASSE rapportée à la terre.	DENSITÉ rapportée à celle de l'eau.	DISTANCE MOYENNE au soleil.	TEMPS DE LA ROTATION des astres AUTOUR DE LEUR AXE.	TEMPS DE LA CIRCULATION autour du soleil.	INTENSITÉ DE LA PESANTEUR à la surface de chaque astre, rapportée à celle qui a lieu à la surface de la terre.
						Jours.	Jours.	
Soleil.	109, 93	1326480	354936, 000	1,39	0	25, 5	»	27,9
Mercure.	0, 39	0,06	0, 175	15,25	0, 387	1, 004	87, 969	1,03
Vénus.	0, 97	0,93	0, 875	5,17	0, 723	0, 973	224, 701	0,98
La Ter re.	1 (1)	1	1	5,48	1	0, 997	365, 256	1
Mars.	0, 56	0,18	0, 139	0,71	1, 524	1, 027	686, 980	0,33
Vesta.					2, 362		1325, 743	
Astrée.					2, 576		1508, 909	
Junon.	Deux ou trois centièmes de la Terre.	»	»	»	2, 669	»	1592, 660	»
Cérès.					2, 767		1681, 400	
Pallas.					2, 773		1686, 538	
Jupiter.	11, 56	1470,2	331, 561	1,42	5, 203	0, 414	4332, 596	2,716
Saturne.	9, 61	887,3	101, 064	0,56	9, 539	0, 428	10758, 970	1,01
Uranus.	4, 26	77,5	19, 809	1,53	19, 183	»	30688, 713	0,95
Le Verrier.	»	»	»	»	36,154	»	79402,0	»

(1) Le diamètre équatorial de la terre est de 12753212 mètres,

Les planètes sont situées à des distances du soleil qui vont sensiblement en doublant. Si l'on prend en effet les nombres suivants, formant une progression géométrique,

0 3 6 12 24 48 96 192 384

et qu'on ajoute 4 à chacun d'eux, on a :

4 7 10 16 28 52 100 196 388

Ces derniers nombres représentent à peu près les rapports entre les distances des planètes au soleil : ils constituent ce que l'on nomme loi de Bode.

Les comparaisons suivantes donnent une idée de ces distances.

Un boulet de canon, qui parcourrait environ 840^{m} par seconde, mettrait moins d'un jour pour aller du centre de la terre à sa surface ; 5 jours 1/2 de la terre à la lune ; 6 ans, pour atteindre le soleil ; 9 ans pour aller du soleil à Mars ; 31 ans, du soleil à Jupiter ; 56 ans 1/2, du soleil à Saturne ; 114 ans, du même astre à Uranus, et enfin près de 215 ans pour arriver à la planète Le Verrier.

La lumière, dont la vitesse est de 70000 lieues par seconde, emploie, pour aller du soleil aux diverses planètes, les temps suivants :

Mercure	....	0^{h} 3′ 10″
Vénus	....	0^{h} 5′ 56″
La Terre	....	0^{h} 8′ 13″
Mars	....	0^{h} 42′ 81″
Vesta, Astrée, Junon, Cérès, Pallas	En moyenne.....	0^{h} 22′ 00

le diamètre polaire de 12712430, et par conséquent le diamètre moyen de 12732821 mètres, ou 3188 lieues de 4000 mètres. Le soleil est éloigné de la terre de 23984 rayons terrestres ou de plus de 38 millions de lieues.

Jupiter	0^h 42′ 45″
Saturne..................	1^h 18′ 23″
Uranus..................	2^h 37′ 37″
Le Verrier....	à peu près 5 heures.

Le mouvement des planètes autour du soleil est soumis à trois lois, découvertes par Kepler, et dont voici l'énoncé :

Première loi. — Les planètes se meuvent dans des courbes planes; les rayons vecteurs décrivent autour du soleil des aires proportionnelles au temps.

Seconde loi. — Les orbites planétaires sont des ellipses dont le soleil occupe un des foyers.

Troisième loi. — Les carrés des temps des révolutions des planètes autour du soleil sont proportionnels aux cubes des grands axes des orbites.

Ces trois lois sont devenues, entre les mains de Newton, la base de la mécanique céleste; ce vaste génie a montré que le mouvement de translation des planètes autour du soleil est le résultat d'une impulsion initiale combinée avec une force attractive émanant du soleil, force qui agit en raison directe des masses et en raison inverse du carré des distances.

Le soleil, centre du système planétaire, est un corps sensiblement sphérique, de plus de 320000 lieues de diamètre, lumineux par lui-même, animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe central, et accomplissant sa révolution en 25 jours 1/2; son équateur est incliné de 7° 30′ sur l'écliptique.

Sa constitution physique ne nous est que très-imparfaitement connue. Laplace, en résumant les opinions des astronomes à ce sujet, a dit que l'on pouvait considérer cet astre comme une masse embrasée donnant lieu à de fréquentes et immenses éruptions, et que les taches que nous présente sa surface n'étaient que de vastes cavités donnant issue par intervalle à des torrents de lave.

Will. Herschel a émis une opinion différente; suivant

ce célèbre astronome, le soleil est un corps solide, obscur, environné d'une atmosphère lumineuse soumise à des fluctuations continuelles, et qui, en s'entr'ouvrant, laisse voir le noyau central, éloigné de 800 lieues de cette atmosphère; ces 800 lieues ne sont que $\frac{1}{400}$ du diamètre solaire; il a été même jusqu'à admettre entre l'atmosphère et le noyau obscur une autre atmosphère très-dense tempérant les effets de chaleur et de lumière, sur le noyau central, au point de le rendre habitable.

Les taches du soleil, vues au télescope avec des verres colorés afin de protéger l'œil, paraissent s'élargir, se resserrer d'un jour à l'autre, disparaître, et se montrer dans d'autres régions. Cet état de choses indique une extrême mobilité dans le fluide lumineux dont Herschel admet l'existence. Ces taches occupant quelquefois des espaces de 16000 lieues carrées, on imagine difficilement des cratères de cette étendue : cependant on doit remarquer que le soleil ayant une surface 12000 fois plus grande que celle de la terre, cette étendue est en rapport avec la grandeur de cet astre, et ne correspond qu'à un cratère de 4000 mètres de largeur à la surface de la terre.

On observe encore à la surface du soleil de larges espaces couverts de raies brillantes, appelées facules, que l'on considère comme les crêtes de vagues immenses de l'atmosphère lumineuse, vagues dont la durée étant souvent de plusieurs jours, semble indiquer une certaine viscosité dans la matière dont se compose l'atmosphère solaire.

Pour expliquer l'état lumineux et calorifique du soleil, on ne peut invoquer que deux causes : l'électricité ou l'incandescence due à une chaleur d'origine, car l'état de combustion ne saurait être invoqué. L'origine électrique supposerait que des courants électriques circulent sans interruption dans l'atmosphère solaire; rien ne s'oppose à cette hypothèse, puisque, partout où il y a de la matière, il peut y avoir production de courants électriques; mais aussi aucune preuve directe ne vient à

l'appui de cette opinion. L'état d'incandescence provenant d'une chaleur primitive ou d'origine est la supposition la plus probable ; elle s'accorde, du reste, avec les idées que nous présenterons ci-dessous sur les causes qui ont concouru à la formation des astres.

Quelques notions sur le mouvement et sur la constitution des planètes sont indispensables pour remonter à l'origine de la terre.

Leur densité, à l'exception de celles de Jupiter et d'Uranus, augmente à mesure qu'elles sont plus rapprochées du soleil.

Mercure, Vénus et Mars n'ont pas de satellites; la terre en a un seul, la lune, située à environ 60 rayons terrestres, c'est-à-dire 400 fois plus près de nous que le soleil. Jupiter a quatre satellites; Saturne en a sept, et en outre un système de plusieurs anneaux à peu près concentriques; enfin deux satellites circulent autour d'Uranus.

Le tableau suivant renferme quelques éléments relatifs aux satellites dont nous venons de parler.

ASTRES.		DISTANCES MOYENNES des satellites à leurs planètes respectives, en fonction des rayons de ces planètes.	DURÉE de la révolution des satellites autour de leurs planètes respectives.
Satellite de la terre.	la lune....	$59^{T},964$.......	...... $27^{jours}, 321$
Satellites de Jupiter.	le 1er.....	...... $6^{j},048$........	...... $1^{jours}, 769$
	le 2e.....	...... 9,623........	...... 3, 551
	le 3e.....	...... 15,350........	...... 7, 155
	le 4e.....	...... 26,998........	...... 16, 689
Satellites de Saturne.	le 1er.....	...... $3^{s},531$........	...... $0^{jours}, 943$
	le 2^{e}.....	...... 4,300........	...... 1, 370
	le 3^{e}.....	...... 5,284........	...... 1, 888
	le 4^{e}.....	...... 6,819........	...... 2, 739
	le 5^{e}.....	...... 9,524........	...... 4, 517
	le 6e.....	...... 22,081........	...... 15, 945
	le 7e.....	...... 64,359........	...... 79, 330
Satellites d'Uranus.	le 1er.....	...... $17^{u},022$........	...... $8^{jours}, 707$
	le 2e.....	...... 22,752........	...... 13, 456
Quatre autres satellites avaient été présumés par Herschel père, mais ils ne sont plus admis, parce que depuis on n'a jamais pu réussir à les voir.			

Les lettres T, j, s, u, *désignent les valeurs des rayons de la Terre, de Jupiter, de Saturne et d'Uranus.*

Si les planètes sont habitées, les conditions de la vie organique sur chacune d'elles ne peuvent être les mêmes que sur la terre, en raison : 1° des différences dans les quantités de chaleur et de lumière qu'elles reçoivent du soleil, 2° des inégalités dans l'intensité de la pesanteur, et 3° des différences de leurs parties constituantes.

L'intensité de la lumière et de la chaleur dépendant sur chaque planète du carré de sa distance au soleil, doit être sept fois plus grande sur Mercure que sur la Terre, deux fois plus considérable sur Vénus que sur celle-ci, et 330 fois moindre sur Uranus. Quant à la planète nouvellement découverte, sa distance est telle, que le soleil n'exerce plus qu'une faible influence pour l'échauffer et l'éclairer. Il n'est question ici, bien entendu, que de la chaleur reçue du soleil et non de la chaleur d'origine, qui a dû se conserver d'autant plus longtemps que la masse était plus considérable.

L'intensité de la pesanteur est trois fois plus grande sur Jupiter que sur la terre; sur Jupiter un homme serait donc écrasé par son propre poids. Sur Mars cette intensité n'est que le tiers de celle de la pesanteur terrestre; sur la lune le sixième, etc. De pareils globes ne peuvent être habités que par des êtres possédant des organes capables d'accomplir des fonctions en rapport avec la nature, la densité et les autres conditions physiques de ces astres.

Vues au télescope, les planètes présentent des apparences qui jettent quelque jour sur leur constitution : Mars et Vénus paraissent entourées d'atmosphères dues à la température élevée et variable de leur surface. Vénus, qui diffère peu de la terre par ses dimensions, se trouve dans des conditions physiques semblables, si ce n'est que la chaleur solaire y est à peu près deux fois plus intense.

On distingue, dans Mars, des parties colorées en jaune d'ocre, d'autres en vert ; les premières sont considérées comme des continents, les secondes comme appartenant à des mers. Vers ses pôles se montrent des taches d'un blanc brillant qui atteignent leur maximum à la fin des longues nuits polaires, et disparaissent après une exposition solaire prolongée; tout porte à les attribuer à des amas de glace.

Le disque de Jupiter présente des bandes ou zones obscures, ne variant jamais quant à leur direction gé-

nérale, qui est perpendiculaire à l'axe de rotation, mais qui se rompent quelquefois et se dispersent sur la surface; ces effets sont dus probablement à des courants analogues à nos vents alizés, circulant dans l'atmosphère de la planète.

Uranus est à une distance si considérable de la terre, qu'elle n'a pu être explorée de manière à fournir des notions précises sur sa constitution physique.

Les planètes situées entre Mars et Jupiter sont si petites qu'on ne peut étudier que bien difficilement leur aspect; nous mentionnerons, toutefois, Pallas, qui offre un aspect nébuleux indiquant une vaste atmosphère.

Les planètes observées jusqu'ici ne sont probablement pas les seules qui composent le système solaire; celles qui ont été récemment découvertes autorisent à penser qu'on en découvrira d'autres, parmi cette multitude d'astres télescopiques à peine explorés jusqu'à ce jour.

Les comètes se présentent sous l'aspect de nébulosités de forme très-variable, offrant un ou plusieurs centres de condensation que l'on appelle noyaux. La matière dont elles sont formées s'étend à d'immenses distances de ces noyaux; ainsi, celles de 1680 et de 1811 étaient accompagnées de cônes de matières gazéiformes, dont la longueur égalait la distance du soleil à la terre. Cette étendue est telle qu'il est très-probable que la terre a pu être enveloppée quelquefois dans la nébulosité que traînent après elles les comètes. Elles circulent autour du soleil dans des orbes très-allongés, comparables à des courbes paraboliques, et dont le soleil occupe un des foyers. Newton a trouvé que les aires décrites par leurs rayons vecteurs suivent une loi analogue à celle que Kepler avait découverte pour les planètes; il est probable que ces courbes paraboliques ne sont que des ellipses très-allongées.

Nous avons déjà signalé comme faisant partie du système solaire une zone de matière se mouvant autour

du soleil, suivant toutes les apparences, et à laquelle on rapporte la lumière zodiacale. Cette lumière se montre dans les beaux temps, un peu après le coucher du soleil, vers les mois d'avril et de mai; ou avant son lever, six mois plus tard. Sa forme est celle d'un fuseau très-étroit, qui s'étend au delà des orbites de Mercure et même de Vénus, dont la base s'appuie sur le soleil, et dont l'axe est dans le plan de l'équateur solaire ; sa longueur atteint souvent 90°.

Nous arrivons à la formation des planètes et en général à celle de tous les astres, une des questions les plus délicates de la philosophie naturelle. Nous rapporterons à ce sujet les conjectures ingénieuses que Laplace a rattachées aux vues de Will. Herschel sur la formation des étoiles. D'après ce grand géomètre la formation des planètes est due probablement à la condensation successive des différentes couches composant primitivement la masse solaire, qui s'étendait bien au delà de la planète la plus éloignée. Le soleil ressemblait alors aux nébuleuses que les télescopes nous montrent comme composées d'un ou de plusieurs noyaux entourés de matière diffuse qui, en obéissant à l'attraction mutuelle de leurs parties, se condense autour de chaque centre, et les transforme en étoiles. Ainsi, il est vraisemblable que les étoiles ont été, dans le principe, des nébuleuses. Bien que l'on n'ait pu suivre toutes les phases de condensation de l'une d'elles dans le petit nombre d'années écoulées depuis les travaux d'Herschel, on peut néanmoins observer ces progrès sur les diverses nébuleuses répandues dans l'espace. En effet, dans certaines régions, on voit la matière diffuse répandue çà et là en amas divers et occupant un vaste espace; dans quelques-uns de ces amas, la matière est déjà faiblement condensée autour d'un ou de plusieurs noyaux; dans d'autres, les noyaux brillent davantage relativement à la nébulosité environnante, et annoncent un degré de condensation plus avancé; plus tard il en résultera l'astre éclatant que nous nommons étoile.

On peut donc concevoir que le soleil a été formé dans un amas de matière gazéiforme qui s'est condensée graduellement autour d'un point central : l'étendue de cet amas ne dépassait pas les points où la force centrifuge était égale à la pesanteur. A mesure que le refroidissement vers le centre s'opérait, les molécules se rapprochaient, et la vitesse de rotation du noyau augmentait d'après les lois de la mécanique sur la conservation des aires. L'atmosphère entourant le noyau central, en se refroidissant, a pu abandonner des zones de molécules qui ont continué à circuler autour de ce noyau. Ces zones ont formé par leur attraction mutuelle des anneaux irréguliers à peu près concentriques au soleil, qu'une condensation ultérieure aura amené à l'état globulaire. Chaque anneau a dû presque toujours se diviser en plusieurs parties, qui ont continué à se mouvoir avec des vitesses peu différentes, en prenant la forme sphéroïdale. Si les parties séparées ont eu assez de puissance pour attirer à elles toutes celles de la même zone, il en sera résulté un seul corps. Plusieurs centres de condensation auront pu s'établir au lieu d'un seul dans le même anneau, et les cinq petites planètes qui circulent à peu près à la même distance du soleil entre Mars et Jupiter, en sont peut-être un exemple.

Les planètes encore à l'état de vapeur ont donné lieu de la même manière à la formation des satellites circulant autour d'elles, comme elles-mêmes tournent autour du soleil.

Indépendamment de ces centres secondaires, il s'en est formé d'autres déjà mentionnés, les aérolithes, les bolides, etc., dont la composition chimique, à peu près semblable, indique une origine commune.

Dans le principe, lors de l'état de nébulosité pendant lequel les éléments ne pouvaient réagir que très-faiblement les uns sur les autres, il est probable qu'il y avait un mélange complexe de ces mêmes éléments; mais à mesure que le refroidissement s'est effectué, il s'est déposé autour de chaque noyau des zones de nature et de

densité diverses; les substances les plus denses les premières, puis celles qui l'étaient moins, et ainsi de suite; ce qui permet d'entrevoir une cause à la différence de densité des planètes. La forme sphéroïdale et l'aplatissement aux pôles est une conséquence de l'état liquide primitif. Le refroidissement continuant, les masses se sont solidifiées à la surface, tandis que les parties intérieures, préservées par la croûte formée, ont conservé une portion peut-être fort considérable de leur chaleur primitive, comme le démontrent, à la surface de la terre, les actions volcaniques et divers phénomènes géologiques dont il sera ultérieurement question.

Les corps de notre système solaire ne sont pas les seuls qui aient attiré l'attention des astronomes; il faut encore y joindre ce nombre pour ainsi dire infini d'étoiles disséminées dans l'espace.

Si nous connaissons tout ce qui concerne le mouvement des planètes, leur action réciproque, il n'en est pas de même de leurs relations avec les autres astres. Quelles sont leurs distances relatives? le soleil est-il fixe au milieu de l'univers; n'est-il pas transporté lui-même autour d'un autre centre planétaire? Les observations faites jusqu'ici sur le mouvement de translation des étoiles ne permettent pas de résoudre complétement ces questions, mais semblent montrer que tout le système solaire marche vers la constellation d'Hercule.

Nous ne possédons de notions précises sur l'astronomie stellaire que depuis la fin du siècle dernier, époque où Will. Herschel fit ses belles découvertes sur le déplacement des étoiles. En mesurant avec soin leurs distances angulaires, on a trouvé que celles qui étaient le plus rapprochées de nous, s'en trouvaient à une distance telle, que l'espace qui sépare les deux positions de la terre à une demi-année d'intervalle, ou le double de la distance du soleil à la terre, vu de l'étoile, est au-dessous d'une seconde de degré; cette distance angulaire est appelée la parallaxe de l'étoile. En prenant cette valeur d'une seconde pour limite supérieure, on

trouve que l'intervalle qui sépare l'étoile fixe la plus rapprochée de nous, du soleil, est égal au moins à 200000 fois la distance du soleil à la terre. Nous citerons comme exemple les étoiles dont la parallaxe est maintenant à peu près connue : α du Centaure, la 61e du Cygne, et Véga de la Lyre. La première a pour valeur 1″; la deuxième, 0″,42; la troisième, 0″3. On en déduit pour les distances au soleil

1°....	200000 fois la distance du soleil à la terre.	
2°....	550000	id.
3°....	700000	id.

La lumière, dont la vitesse est de 70000 lieues par seconde, mettrait trois, huit et onze ans pour franchir les distances qui séparent ces astres du soleil. Ces distances effrayent déjà l'imagination; que ne doit-on pas penser de celles qui nous séparent des étoiles télescopiques, qui sont des milliers de fois plus éloignées encore! La lumière mettrait donc des milliers d'années pour arriver jusqu'à nous, et continuerait à nous faire voir ces astres pendant un laps de temps considérable alors qu'ils n'existeraient plus. On voit quelle idée nous devons avoir de l'immensité de l'espace, d'après de semblables distances.

Indépendamment des étoiles considérées comme fixes, sous le rapport de leur position respective et de leur éclat, il existe encore des étoiles sujettes à des accroissements périodiques d'intensité lumineuse, et d'autres qui s'éteignent. Telles sont celles qui brillèrent tout à coup dans Cassiopée et dans le Serpentaire, et cessèrent de luire quelque temps après.

En examinant à l'aide d'instruments d'optique perfectionnés les positions relatives des étoiles, on a reconnu qu'elles formaient des systèmes binaires ou ternaires, dans lesquels leurs distances changent avec le temps. Ces étoiles tournent autour les unes des autres, suivant les lois de la gravitation planétaire. Ces sys-

tèmes, composés de plusieurs soleils diversement colorés, ont peut-être aussi des planètes et des satellites.

Les étoiles visibles à la vue augmentent en nombre en approchant d'une zone lumineuse qui entoure la sphère céleste suivant un grand cercle appelé voie lactée, et dans l'intérieur duquel se trouve le système solaire. Cette zone nous apparaît comme une traînée lumineuse qui se bifurque dans la constellation du Cygne; la branche secondaire va rejoindre la branche principale à 120° de distance vers la queue du Scorpion.

A l'aide de ses puissants télescopes, Herschel a reconnu que la voie lactée est composée d'une multitude innombrable de petites étoiles dont la concentration est telle en certaines parties, qu'il a évalué le nombre de celles qui ont dû passer sous ses yeux, pendant une heure, à 50000.

En admettant, ce qui du reste est probable, que les distances entre les diverses étoiles de ce système fussent du même ordre de grandeur, il s'ensuivrait que la distance qui sépare deux petites étoiles de la voie lactée voisines l'une de l'autre, et qui se confondent presque à nos yeux, serait analogue à celle qui nous sépare des étoiles les plus rapprochées de nous. Il résulte d'une évaluation basée sur les intensités lumineuses, que la grandeur de cet amas lenticulaire d'étoiles, dans lequel le système solaire n'est qu'un point, est telle, qu'il faudrait plus de 2000 ans à la lumière pour aller d'une extrémité à l'autre.

La voie lactée offrant un maximum d'intensité vers la croix du sud, entre Sirius et Antarès, il paraîtrait que le système solaire ne serait pas placé au centre de cet amas, mais qu'il occuperait une position excentrique. Quelques astronomes pensent que la voie lactée est vide à l'intérieur et présente la forme d'un anneau comme la nébuleuse annulaire de la Lyre. Suivant cette conjecture, le soleil serait placé dans l'intérieur de l'anneau, près du bord interne.

En résumé, le système solaire, devenu par l'effet de

la condensation une étoile entourée de planètes et de satellites, semble faire partie d'un immense amas d'étoiles (la voie lactée) de forme lenticulaire ou annulaire, et qui provient peut-être lui-même d'une nébuleuse beaucoup plus vaste, dans laquelle la matière s'est groupée autour d'une immense quantité de centres de condensation formant aujourd'hui des étoiles.

Les taches lumineuses répandues çà et là dans l'espace, vues avec de forts télescopes, paraissent, pour la plupart, composées d'étoiles agglomérées dans des régions dont les contours sont nettement marqués, et qui offrent, séparément, l'aspect d'une vive lumière vers le centre, où la condensation est ordinairement la plus grande. Le nombre de ces étoiles est si considérable, que Herschel a reconnu que plusieurs de ces amas en renferment dix à vingt mille dans une étendue de 8 ou 10 minutes. Ces régions d'étoiles, ces groupes de soleils, constituent probablement autant de systèmes particuliers soumis à des lois qui leur sont propres, et forment, au milieu de l'univers, des espèces d'îles séparées les unes des autres par des intervalles qui sont infiniment grands relativement à leurs dimensions propres.

La réflexion suivante peut servir encore à donner une idée de l'immensité de l'espace : nous avons dit que la voie lactée, cette réunion de soleils dont notre soleil fait partie, paraît d'une telle dimension que pour la traverser d'une extrémité à l'autre il faut deux mille ans à la lumière, qui franchit soixante-dix mille lieues par seconde: eh bien! un observateur placé sur un soleil appartenant à une autre nébuleuse, verrait la voie lactée tout entière avec une dimension angulaire analogue à celle sous laquelle nous apercevons cette même nébuleuse de la terre !

Arrêtons-nous, car nous devons craindre de nous égarer, en cherchant à étendre les déductions de cette théorie, qui de longtemps ne pourront être vérifiées par l'observation. Espérons que les découvertes dont s'enrichit journellement la physique, et les perfectionne-

ments qu'on apporte dans la construction des instruments, permettront à l'astronomie de reculer un jour, dans ses investigations, les limites que nous assignons actuellement au possible.

Le tableau de l'univers, que nous venons d'esquisser, était indispensable pour l'intelligence de ce que nous allons dire sur la formation de la terre et les phénomènes physiques qui ont lieu à sa surface et dans son enveloppe aérienne.



CHAPITRE PREMIER.

DE LA CROUTE SOLIDE DU GLOBE.

Section I.

De la composition du globe.

L'origine ignée de la terre ne saurait être mise en doute quand on considère, d'une part, son aplatissement aux pôles, indiquant un état primitif de liquéfaction; l'accroissement de température avec la profondeur, à partir d'une certaine distance au-dessous du sol; les phénomènes volcaniques et les eaux thermales; de l'autre, la croûte terrestre formée de matières oxydées ou brûlées, et l'atmosphère ne renfermant plus qu'une faible proportion d'oxygène, la plus grande partie de celle qui s'y trouvait dans le principe ayant servi probablement à la production des oxydes. Cela posé, et en nous appuyant sur les données que fournit l'astronomie, il est permis de croire que la terre, formée primitivement d'un amas de vapeurs, débris de l'atmosphère solaire, soumise à un refroidissement graduel, par suite du rayonnement dans les espaces célestes, est passée de l'état gazeux à l'état liquide, après quoi sa surface s'est recouverte d'une couche solide dont l'épaisseur a augmenté avec le temps.

Cette couche, en raison de son étendue et du retrait résultant d'un refroidissement irrégulier, s'est brisée en plusieurs points; les fragments détachés ont dû d'abord nager sur le bain liquide, se sont ressoudés ensuite par l'effet du refroidissement, puis brisés de nouveau. Pendant que ces effets se produisaient, les agents atmosphériques agissaient puissamment sur les matières déjà soli-

difiées. Ces réactions devaient être suivies d'un dégagement de chaleur énorme, d'explosions, de déchirements, et de retour à l'état gazeux ou liquide de quelques-unes des substances déjà déposées. Ces boursouflements, ces déchirements avaient de l'analogie avec les effets que l'on observe dans les opérations de fusion de nos laboratoires, quand le creuset renferme des substances qui ne se solidifient pas en même temps et qu'il se dégage des gaz.

Le maximum d'élévation de température devait se trouver au contact même des substances qui réagissaient les unes sur les autres. Ces effets durent se reproduire toutes les fois qu'il se formait une nouvelle couche capable d'être attaquée chimiquement par les agents atmosphériques. La couche déjà solidifiée exerçant une pression sur le bain liquide, il est arrivé que des matières liquéfiées se sont fait jour à travers les fissures et sont venues se déverser à la surface en produisant des explosions capables de briser la croûte. On conçoit dès lors comment il a pu se faire que la température de la terre, au lieu de s'abaisser toujours graduellement, se soit élevée brusquement quand des réactions chimiques sont venues troubler la consolidation des couches supérieures.

Aussitôt que la croûte solide reposant sur le bain liquide eut acquis une certaine épaisseur, les parties intérieures du globe continuant à se refroidir, il en est résulté une diminution de volume dans la masse centrale qui a dû produire des plissements dans la croûte et des inégalités à la surface extérieure de l'écorce.

L'eau est un des derniers agents qui dut réagir chimiquement, puisqu'elle ne parut à l'état liquide que lorsque la température de la surface terrestre fut suffisamment abaissée. Cette température était toutefois supérieure à 100°, à cause de la pression exercée par les vapeurs qui se trouvaient alors dans l'atmosphère. Les premières matières solidifiées, après avoir été modifiées par les agents atmosphériques, ont été ensuite dégradées

par les eaux, puis transportées dans les parties basses.

Il est bien difficile de décrire toutes les réactions chimiques qui se produisirent dans les premiers temps de la formation de la terre; on pourrait imaginer bien des théories à ce sujet. Nous nous bornerons à dire qu'il est infiniment probable que l'atmosphère renfermait alors une beaucoup plus grande proportion d'oxygène qu'aujourd'hui, et que la quantité de ce gaz qui a été enlevée a contribué à la formation de tous les oxydes alcalins, terreux et métalliques; ces oxydes, en se combinant entre eux, ont produit les roches primitives, ou terrains de cristallisation. Suivant quel ordre se sont-ils formés? on l'ignore. Il est à croire que le granit, qui occupe de grands espaces, formait la base des continents lors de l'apparition des premiers dépôts sédimentaires. A mesure que ces dépôts s'effectuaient, de nouvelles roches cristallines se montraient à de certaines époques. Ces roches, dans l'impossibilité où nous sommes de percer tous les terrains de sédiment pour aller à la rencontre des couches formées dans les premiers temps de la solidification de la surface terrestre, peuvent jeter quelque jour sur la nature de ces dernières; nous sommes ainsi amené à parler, d'abord des terrains de sédiment ou d'origine aqueuse, qui sont essentiellement distincts des terrains cristallisés ou d'origine ignée.

Les terrains de sédiment sont en couches parallèles ordinairement horizontales ou plus ou moins inclinées à l'horizon, selon qu'elles ont été soulevées, affaissées ou dérangées de leur position primitive par des commotions intérieures. Ils sont composés, comme leur nom l'indique, de cailloux roulés, de sable, de diverses espèces de limon et de calcaires, enlevés et abandonnés ensuite par les eaux. Au milieu de ces terrains se trouvent déposés les restes plus ou moins bien conservés de la flore et de la faune de l'ancien monde. Leur formation a dû commencer aussitôt que la surface terrestre fut suffisamment refroidie pour que l'eau pût s'y maintenir à l'état liquide. Cette eau, en s'écoulant pour se rendre dans les

vastes dépressions produites lors des premiers cataclysmes, ravina la terre, enleva les substances qui ne pouvaient résister à son passage, et les déposa successivement suivant leur grosseur et leur densité, à mesure qu'elle perdait de sa vitesse.

Des circonstances locales telles que des éboulements, des escarpements à pic, des excavations naturelles ou artificielles, permettent d'étudier les dépôts de sédiment suivant leur ordre de formation, ordre qui est constant dans toutes les parties du globe.

On compte vingt-sept principaux dépôts, se divisant et se sous-divisant en plusieurs autres, ayant chacun des caractères propres à pouvoir les distinguer. Voici ces dépôts, en commençant par les plus modernes :

	Alluvions modernes.
	Alluvions anciennes.
Dépôts de la Bresse, collines Subapennines, gypse.	Terrain subapennin.
Falhuns, molasse et nagelffue, gypse d'Aix.	Terrain de molasse.
Gypse parisien, calcaire grossier, argile plastique.	Terrain parisien.
Craie blanche. Craie marneuse.	Terrain crétacé supérieur.
Craie tuffeau. Craie verte. Grès vert. Dépôts néocomiens.	Terrain crétacé inférieur.
Groupe portlandien. Groupe corallien. Groupe oxfordien. Grande oolithe. Lias.	Dépôts jurassiques.

Marnes irisées. Calcaire conchylien. Grès bigarré.	**Terrain de trias.**
Grès vosgien. Calcaire pénéen. Grès rouge.	Terrain pénéen.
Grès houiller. Calcaire carbonifère.	Terrain houiller.
Vieux grès rouge, grès divers, schiste anthraciteux.	Terrain dévonien.
Calcaires et schistes argileux.	Terrain silurien et cambrien.
Schistes micacés, calcaires, gneiss.	Terrain stratifié et cristallin.

Terrains anciens inconnus.

Nous ne décrirons chacune de ces divisions que lorsqu'il sera question de l'apparition successive des corps organisés qui est liée à leur formation. Nous nous bornerons pour l'instant à la remarque suivante : la plupart de ces divisions renferment du calcaire, de l'argile, du grès et du sable, substances qui ont été primitivement dissoutes ou tenues en suspension dans les eaux; celles qui étaient en suspension, les plus grosses, se sont déposées en premier lieu et ont produit les sables et les grès; l'argile, en raison de l'extrême division de ses parties, est venue ensuite; le calcaire a paru aussitôt que l'agent qui le tenait en dissolution eut disparu. L'argile provenant des parties les plus ténues s'est déposée, à diverses reprises, avant et pendant les dépôts calcaires. Outre ces substances, il existe dans les divers terrains des dépôts de combustibles, houille, lignite et tourbe, en couches ou en amas plus ou moins considérables, dont la puissance a

été en diminuant depuis la formation houillère jusqu'à l'époque actuelle.

Les roches d'origine ignée, qui ont paru successivement, dans les terrains de sédiment, en les soulevant et se faisant jour au travers, à peu près à la manière des éruptions volcaniques, sont : le granit, les porphyres, les diorites, les serpentines, les euphotides, les mélaphyres, les basaltes, les trachytes, les phonolithes, les micaschistes et les amygdaloïdes;

Le granit, réunion de trois substances cristallisées, le feldspath, le mica et le quartz; le talc remplaçant le mica, la roche constitue la protogine;

Les porphyres, roches à pâte compacte, ordinairement feldspathique, renfermant des cristaux qui appartiennent souvent à la même substance;

La diorite, roche feldspathique compacte, colorée en vert ou en noir par l'amphibole, avec laquelle elle est intimement mélangée;

La serpentine, roche magnésienne, d'un vert obscur, à texture ordinairement compacte, et dont la surface, souvent tachetée de vert, de jaunâtre ou de rougeâtre, a l'aspect de la peau d'un serpent;

L'euphotide, roche feldspathique compacte, avec jade et diallage;

Le mélaphyre, ou porphyre noir, roche composée ayant pour base une pâte noire et dure de labrador et de pyroxène : les parties disséminées dans la pâte sont ordinairement des cristaux de ces deux substances;

Le basalte, roche pyroxénique, qui se distingue par la forme prismatique qu'elle affecte;

Le trachyte, roche feldspathique terreuse, compacte, d'un aspect terne et mat;

La phonolithe, roche intermédiaire entre les basaltes et les trachytes et renfermant de la mésotype; structure tabulaire ou schiteuse; elle est sonore;

Le micaschiste, roche schisteuse, composée de feuillets alternatifs de quartz et de mica;

Les amygdaloïdes, roches d'agrégation;

Toutes ces roches, nous le répétons, ont paru à la suite de soulèvements, d'explosions, de déchirements.

Les roches granitiques ont commencé à se montrer avec les premiers terrains de sédiment, sans qu'on puisse dire si elles existaient auparavant. Leur éruption, d'abord considérable, a diminué à mesure que ces terrains prenaient de l'épaisseur, et a cessé lors de la formation tertiaire.

Les porphyres argileux et quartzifères, les diorites, les serpentines, les euphotides se sont fait jour pour la première fois à l'époque silurienne. Ces roches se sont prolongées plus ou moins loin. Les porphyres ont traversé le terrain houiller, dans lequel ils ont formé des filons; le grès rouge, où ils ont constitué des amas et même des plateaux; ils n'ont pas été au delà du grès bigarré.

Les serpentines et les euphotides se sont montrées dès les terrains de transition; leur épanchement s'est continué jusqu'aux terrains tertiaires supérieurs. Suivant M. Beudant, auquel nous empruntons ces données, les diorites et les trapps ont commencé dans le terrain houiller et ont été jusque dans le terrain tertiaire.

Les mélaphyres ont paru pour la première fois dans le grès rouge, puis dans la formation jurassique, qu'ils ont soulevée, et ont continué à se montrer jusqu'aux terrains subapennins, qu'ils ont soulevés également.

Le basalte a paru seulement à l'époque de la craie, et s'est montré ensuite à travers tous les dépôts subséquents, jusqu'à l'époque actuelle.

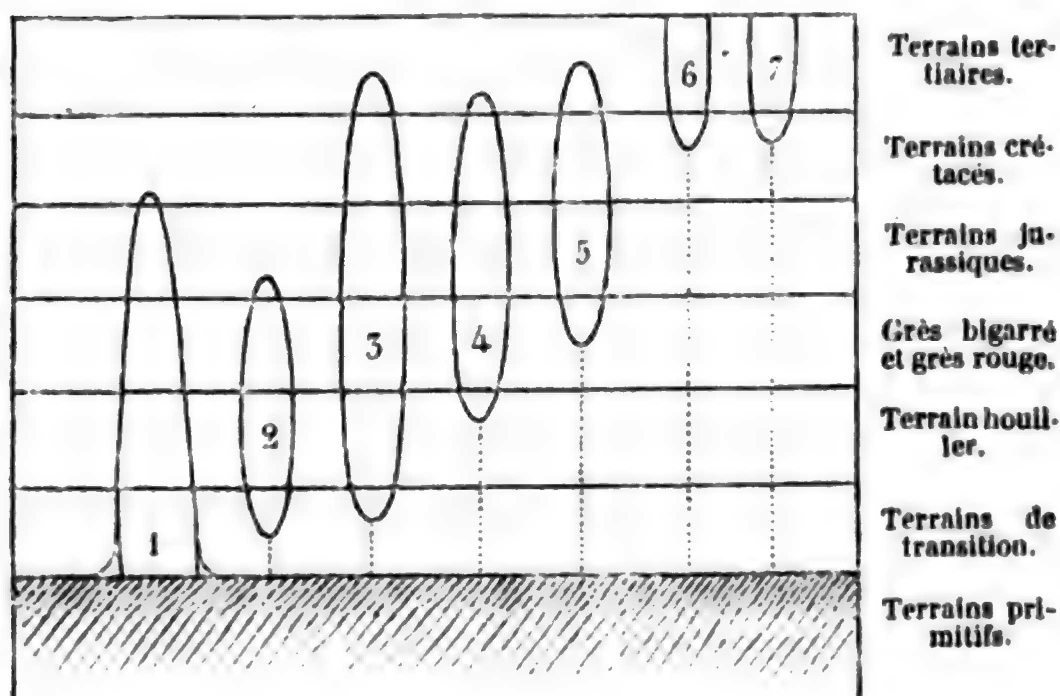
Les trachytes sont arrivés un peu plus tard que les basaltes, puisqu'on n'en a pas trouvé dans les craies. Ils n'ont commencé probablement à paraître que dans les terrains analogues au calcaire grossier parisien. Dans le Cantal, ils sont postérieurs au terrain de molasse. Ils ont continué à se montrer en formant des montagnes qu'ils ont soulevées graduellement.

Les phonolithes datent à peu près de la même époque.

Les amygdaloïdes sont de tous les temps, depuis la formation de la croûte jusqu'à nos jours. Enfin, nous

ajouterons que les éjections de roches cristallines qui étaient plus considérables et à l'état pâteux, dans les temps anciens, devinrent plus liquides et moins abondantes à l'époque de la craie. Les trachytes et les basaltes sont en général les premières roches qui se soient répandues en nappes; on a néanmoins des exemples de trachytes qui ont été à l'état pâteux.

La figure ci-jointe permet d'embrasser d'un seul coup d'œil les époques de l'apparition et de la disparition des roches que nous venons d'énumérer.



1. Granit.
2. Porphyres quartzifères.
3. Serpentines et euphotides.
4. Diorites et trapps.
5. Mélaphyres.
6. Trachytes.
7. Basaltes.

Nous ignorons la nature des roches cristallisées ou primitives antérieures aux précédentes.

La densité de la terre peut-elle nous indiquer à quelle classe de corps appartiennent les matières qui

remplissent les parties centrales? Cela n'est pas probable, car on ignore quelles sont les conséquences de la compression et de l'élévation de température auxquelles elles sont soumises. De Laplace a démontré effectivement qu'un globe d'eau du volume de la terre aurait en moyenne une densité égale à 9 par la compression seule, la température restant la même et étant de 15°. (*Mécanique céleste*, tome v, page 65.)

La densité moyenne de la terre a été évaluée par Cavendish, et ensuite par plusieurs physiciens, à 5,48, ou environ cinq fois et demie celle de l'eau. Connaissant approximativement la composition de la croûte et par suite sa densité, on peut jusqu'à un certain point déterminer la densité moyenne des parties intérieures, sans spécifier quelle en est la cause.

Suivant M. Cordier, la croûte terrestre, supposée de 10 à 15 lieues d'épaisseur, a pour composition approximative :

Feldspath	0, 48.
Quartz	0, 35.
Mica	0, 08.
Talc	0, 05.
Carbonate de chaux / Magnésie et coquilles	0, 01.
Amphibole, diallage, pyroxène, péridot	0, 01.
Argile, alumine hydratée	0, 01.
Autres substances minérales	0, 01.
	1, 00.

En supputant la silice contenue dans ces diverses substances, on trouve qu'elle forme la plus grande partie de l'écorce du globe. En effet on a :

Oxygène	0, 40.
Silicium	0, 33.
Les autres substances	0, 27.
	1, 00.

D'un autre côté, le feldspath, qui est un des éléments les plus importants de l'écorce terrestre, le quartz et le mica ont pour densité :

Feldspath	2, 56.
Le quartz.....................	2, 65.
Le mica et le carbonate de chaux..	2, 70.

Les substances très-peu répandues, telles que le grenat, l'amphibole, ont une densité qui n'excède pas 4,20 ; celle des pyrites peut aller à 5. Les métaux et leurs composés sont en quantités tellement minimes relativement à la masse de la terre, qu'ils peuvent être négligés.

En partant de ces données, la densité moyenne de l'écorce peut être portée à 2,70 environ ; il faut donc qu'au-dessous de la croûte solide la densité moyenne des parties constituantes soit plus grande que 5,5, qui est, comme nous l'avons vu, la densité moyenne de tout le globe.

Nous nous sommes appuyé jusqu'ici, pour expliquer la formation de la terre en lui attribuant une origine ignée, sur les opérations chimiques que nous produisons dans nos laboratoires, et qui peuvent être assimilées à celles de la nature, puisque les unes et les autres dépendent des mêmes forces. Nous jugeons à la vérité de la nature des roches réellement primitives par celle des roches qui se sont fait jour à travers les terrains de sédiment ; mais les données que fournit la géologie permettent de leur supposer une composition analogue ; du reste, les développements dans lesquels nous allons entrer relativement à la chaleur terrestre viendront à l'appui de l'origine ignée de notre planète, aujourd'hui universellement admise.

Section II.

§ I. *De la température de la terre au-dessous de la couche invariable.*

Le soleil projette journellement sur la surface de la terre de la chaleur rayonnante, dont la quantité dé-

pend, en chaque lieu, de la latitude et de diverses causes atmosphériques que nous ferons connaître. Les effets de cette émission calorifique ne sont sensibles que jusqu'à une certaine profondeur, où se trouve une couche dont la température est invariable ; au-dessous de cette couche la température augmente, et devient sensible d'autant plus que l'on s'en éloigne davantage. Mais avant d'indiquer la loi que suit l'accroissement de température avec la profondeur, nous décrirons les instruments destinés à l'observer, ainsi que ceux du même genre qui sont employés lorsque l'observateur se trouve dans l'impossibilité de suivre à chaque instant les changements de température.

Ces instruments sont des thermomètres à mercure et à alcool, et des appareils thermo-électriques.

Les thermomètres à mercure sont à échelles fixes ou à échelles arbitraires. Leur construction exige des précautions sans lesquelles on ne peut avoir que des approximations, attendu : 1°, que les tubes thermométriques ne sont jamais cylindriques ; 2°, que lorsqu'on a pris pour points fixes la glace fondante et la vapeur d'eau bouillante, en notant la pression atmosphérique (la température variant de 1° pour une différence de 27 millimètres de pression), le zéro se déplace avec le temps; 3° que lorsqu'on soumet un thermomètre à un brusque échauffement, il peut y avoir des déplacements analogues provenant de ce que les parties constituantes ne reprennent pas immédiatement après le refroidissement leur première position d'équilibre.

Quand on n'a besoin que d'une certaine approximation, on fait usage de thermomètres à échelle fixe, gradués plusieurs mois après leur construction, et après s'être assuré que le zéro ne varie plus; pour des recherches précises, il est nécessaire de se servir de thermomètres à échelle arbitraire, qui permettent de vérifier les points fixes de temps à autre. Leur construction est indiquée dans tous les traités de physique.

Les thermomètres à alcool sont employés seulement

lorsqu'il s'agit d'observer des températures très-basses, car le mercure se congelant à—40°, sa dilatation ne doit pas rester uniforme en approchant de son changement d'état. L'usage de ces thermomètres doit être restreint, attendu que la dilatation de l'alcool, comme celle des autres liquides dont on a fait usage, tels que le carbure de soufre, etc., est très-irrégulière. Nous ajouterons, toutefois, que la dilatation de l'alcool et du carbure de soufre étant six fois plus considérable que celle du mercure, on aperçoit facilement de légers changements dans la colonne des thermomètres construits avec ces liquides.

En météorologie on a besoin, en outre, de thermomètres à maxima et à minima quand il s'agit d'observer dans des lieux profonds, ou lorsqu'on veut avoir la température maximum ou minimum du jour.

Thermomètres à maxima. — Parmi les thermomètres à maxima, nous citerons d'abord celui de Rutherford, qui a été longtemps en usage; il est horizontal et à mercure. Le mercure, en se dilatant, pousse un petit cylindre d'acier qui s'arrête lorsque la colonne thermométrique a atteint sa plus grande longueur, et marque par conséquent la température maximum du lieu où se trouve l'appareil. Ce thermomètre, qui n'est pas toujours d'un emploi facile, a l'inconvénient de laisser passer le mercure entre l'index et le tube, ce qui le rend fautif.

Le thermométrographe (pl. I, fig. 1) consiste en un tube recourbé plein d'alcool en *r*, et contenant du mercure en *m i m'*. Sur le mercure sont des index *b*, *h*, qui marchent à frottement dans le tube, de telle sorte que s'ils sont en acier, par une légère secousse ou l'action d'un aimant, on les amène au contact du mercure; alors un abaissement de température élève l'index *b*, et une élévation de température élève *h* dans le tube *im*. Cet instrument indique en même temps les maxima et les minima. Plusieurs causes rendent son emploi borné : les index tombent à la moindre secousse; il est formé

de deux liquides, dont l'un se dilate uniformément et l'autre irrégulièrement. On obvierait jusqu'à un certain point à ce dernier inconvénient en le graduant de degré en degré par comparaison.

Un des thermomètres à maxima dont on fait usage le plus fréquemment aujourd'hui dans les observations qui demandent beaucoup d'exactitude, est le thermomètre à déversement de M. Walferdin. C'est un thermomètre à mercure et à échelle arbitraire (pl. I, fig. 2); il est terminé intérieurement à sa partie supérieure par une pointe très-fine *b* venant déboucher dans un réservoir *a*. L'appareil est purgé d'air, et on détermine combien un degré centigrade occupe de divisions sur la tige du thermomètre.

Quand on veut observer, on remplit la tige jusqu'à la pointe *b*, à une température quelconque que l'on sait inférieure à celle que l'on cherche; on donne une secousse pour détacher la partie de la bulle de mercure qui se trouve à la pointe de la tige, et alors tout le mercure excédant, provenant de l'élévation de température, se rend dans le réservoir *a*, qui en contient toujours un excès; on met ensuite l'appareil en expérience, après l'avoir garanti de la pression en le renfermant dans un autre tube, s'il est destiné à être descendu dans un trou de sonde. Quand l'expérience est terminée, on retire l'appareil et on le place dans un milieu de comparaison, dont la température, inférieure à celle du maximum, est déterminée à l'aide d'un thermomètre étalon; on note le point où la colonne de mercure s'arrête dans la tige; on ajoute à la température du milieu celle qui correspond à la différence entre le niveau actuel du mercure dans la tige et la dernière division située vers *b*, puis la valeur de la petite partie non divisée jusqu'à la pointe, laquelle est déterminée une fois pour toutes. On a alors la température cherchée.

Cet instrument, lorsqu'on a l'habitude de s'en servir, comporte une assez grande exactitude. La seule condition difficile à remplir est d'avoir un milieu de compa-

raison dont la température soit sensiblement uniforme.

Thermomètres à minima. — Rutherford a construit un thermomètre à minima analogue à son thermomètre à maxima. Il est horizontal et à alcool; dans l'intérieur de la colonne thermométrique se trouve un petit index en agate ou en verre. Lorsque l'alcool se contracte par l'effet d'un abaissement de température, le cylindre suit le mouvement de l'extrémité de la colonne liquide, en vertu de l'action capillaire; et quand la colonne s'arrête, puis revient sur ses pas, le petit index, en raison de son poids, reste en place, et l'alcool glisse le long des parois du tube. La position de l'index indique la température minimum du lieu de l'observation. Ce thermomètre à échelle fixe, quand il est gradué par comparaison avec un thermomètre étalon, peut donner d'assez bons résultats.

M. Walferdin a construit un thermomètre à minima qui n'a pas la précision de son thermomètre à maxima : il se compose (fig. 3) d'un tube rempli d'alcool, terminé inférieurement par une petite pointe *c* qui débouche dans la cuvette au fond de laquelle se trouve une petite quantité de mercure *m*; c'est donc un thermomètre à deux liquides, dont l'un, le mercure, se dilate régulièrement, et l'autre, l'alcool, irrégulièrement.

Quand on veut opérer, on donne au thermomètre une température supérieure à celle que l'on veut observer, puis on renverse l'instrument; la pointe *c* baigne alors dans le mercure; l'instrument doit rester dans cette position jusqu'à la fin de l'opération. Après cela, on le descend ainsi renversé dans le lieu où l'on veut observer un minimum de température. L'alcool se contracte et reste dans la cuvette; lorsque ensuite on retire le thermomètre, la température s'élève, et l'on voit le mercure pénétrer dans la tige *c a*. On place l'appareil ainsi disposé dans un milieu de comparaison, et on note la division où s'arrête le mercure. On connaît combien il faut de divisions pour correspondre à un degré, et, en retranchant de la température du milieu celle qui corres-

pond au nombre de divisions occupées par le mercure, on a la température minimum. Il est nécessaire que le tube *c a* soit plus long que la colonne thermométrique qui correspondrait à l'abaissement de température que l'on veut observer, afin que le mercure ne rentre pas dans le réservoir *a*. Ce thermomètre est très-sensible, à la vérité, mais il a l'inconvénient des thermomètres à alcool, les irrégularités de dilatation entre les deux liquides pouvant apporter des incertitudes dans les observations.

Pour obtenir la température minimum au fond d'un lac, de Saussure a employé une méthode qui, d'après ce que nous venons de dire sur les thermomètres à minima, est encore usitée aujourd'hui; elle consiste simplement à entourer un thermomètre ordinaire de corps très-mauvais conducteurs avant de le descendre dans le lac, à l'y laisser pendant un certain temps, puis à le retirer rapidement, et à lire la température qui est celle du lieu où l'appareil a séjourné.

On a aussi proposé d'autres thermomètres à déversement, ainsi que des thermomètres métalliques qui tracent eux-mêmes les variations de température. Il est à désirer, pour la facilité des observations, que l'usage de ces derniers instruments se répande dans les observatoires météorologiques.

Appareils thermo-électriques. — Ces appareils sont précieux quand il s'agit d'observations instantanées. On peut voir leur construction et leur usage dans le *Traité de l'électricité et du magnétisme* (Becquerel), tome IV, page 6, et dans le *Traité de physique appliquée*, tome II, page 42.

Exposons maintenant les observations que l'on a recueillies sur l'accroissement de température depuis la couche invariable jusqu'aux plus grandes profondeurs où l'on soit parvenu.

Cassini avait déjà remarqué, en 1671, que la température n'éprouvait aucun changement dans les caves de l'Observatoire. En 1783, un appareil y fut établi à

une profondeur de 27 mètres 60 centimètres, par le comte de Cassini et Lavoisier, dans le but d'étudier régulièrement la température de ce lieu : on éleva, à cet effet, un massif en pierre sur lequel fut placé un grand vase en verre rempli de sable très-fin, et dans lequel fut ajusté un thermomètre dont l'échelle était gravée sur verre. Les observations commencèrent aussitôt, et furent interrompues pendant un certain nombre d'années, puis reprises longtemps après par M. Bouvard. Ces observations démontrèrent que pendant soixante-quinze ans la température des caves de l'Observatoire n'avait pas varié, puisqu'elle avait toujours été égale à 11°,70, les variations n'allant pas au delà de 0,25 de degré. On est parti de ce fait pour avancer qu'il devait exister dans tous les lieux de la terre, à une certaine profondeur, des points où la température était constante, quelles que fussent d'ailleurs les variations qui avaient lieu à la surface; profondeur dépendante de la latitude et de diverses causes locales. Au-dessous de cette couche invariable, la température augmente avec la profondeur.

On avait observé en outre depuis longtemps que, dans les mines, on éprouvait une chaleur sensible que l'on attribuait soit à la décomposition des pyrites ou à d'autres réactions chimiques, soit à un feu central dont les anciens soupçonnaient déjà l'existence. La première explication fut facilement écartée. Pour savoir jusqu'à quel point la seconde était exacte, on se livra à une série d'observations thermométriques. Gensanne est le premier qui ait étudié ce phénomène en 1740, dans les mines de plomb de Géromagny, avec un thermomètre placé à diverses profondeurs. Ces observations mirent en évidence l'augmentation de la température avec la profondeur. Des expériences semblables furent faites par de Saussure en 1785, dans le canton de Berne, dans un puits creusé à la recherche du sel gemme. M. de Humboldt, en 1791, dans les mines de Freyberg, et Daubuisson, en 1802, s'occupèrent de

cette question, qui n'a pas cessé depuis d'attirer l'attention des physiciens et des voyageurs.

Pour observer cette température, on profite de toutes les excavations naturelles et artificielles, et mieux encore des puits artésiens et des trous de sonde. Dans les galeries de mine, on établit des thermomètres à poste fixe, au fond de trous pratiqués dans la roche à une certaine profondeur. Dans les puits artésiens, on fait usage de thermomètres à maxima. Lorsque les observations ont lieu dans les mines, il est nécessaire de se mettre à l'abri des courants d'air, de la chaleur communiquée par les mineurs et les lampes, de l'influence de la chaleur propre des eaux qui affluent sans cesse dans ces travaux, et qui arrivent des parties supérieures dont la température est moins élevée.

Les résultats suivants, obtenus par M. Cordier dans des mines de houille, montrent, par leur désaccord, qu'il est bien difficile d'obtenir de la régularité dans les observations faites au milieu des mines. En effet, il a trouvé un accroissement de 1° pour une profondeur moyenne

de 36 mètres, à Carmeaux;
19 mètres, à Liffry;
15 mètres, à Decize.

La grande différence entre ces résultats provient de causes locales, telles que le plus ou moins d'épaisseur du terrain houiller, l'inégale conductibilité des couches verticales du même terrain, etc., etc., et peut-être encore de causes accidentelles.

Les puits forés donnent des résultats qui sont influencés aussi par des causes locales, mais qui sont à l'abri du moins des effets de chaleur produits dans les mines par la présence des mineurs et des lampes. Nous devons faire remarquer, toutefois, que la température des diverses couches du globe, jusqu'à de grandes profondeurs, doit participer de celle des eaux qui les traversent, de même que la température des eaux participe jusqu'à

un certain point de celle des terrains qu'elles parcourent. Il existe donc une dépendance mutuelle entre la température des eaux et celle des terrains, dépendance qui doit être prise en considération dans les observations, et que les faits suivants mettent en évidence.

Lorsqu'on pratique des puits ou des trous forés dans certaines localités jusqu'à des profondeurs suffisantes, on arrive à des nappes d'eau qui jaillissent jusqu'à la surface du sol et souvent même au-dessus. Il existe en outre des fontaines naturelles qui jouissent de la même propriété. Les sources qui les produisent sont alimentées par l'eau de pluie qui pénètre à travers les fissures du sol jusqu'à la rencontre d'une couche imperméable, telle que l'argile. Si les eaux viennent d'un pays montueux, elles s'élèvent pour reprendre leur niveau aussitôt qu'on leur donne issue. Cela posé, examinons comment les eaux pluviales peuvent exister et circuler dans les terrains primitifs et les terrains de sédiment, qui comprennent les terrains intermédiaires, secondaires et tertiaires.

Les terrains primitifs, ou d'origine ignée, ne sont pas stratifiés. Les fentes ainsi que les fissures qui se trouvent dans les roches granitiques et autres ont, en général, peu de largeur, peu de profondeur, et communiquent rarement ensemble; elles sont la conséquence du retrait que ces masses ont éprouvé lors de leur refroidissement; les infiltrations de l'eau doivent donc avoir des parcours très-bornés; l'expérience prouve en effet que les sources y sont très nombreuses, mais peu abondantes. Ces terrains sont donc ceux qui peuvent servir à étudier avec le plus d'avantage la chaleur terrestre.

Les terrains intermédiaires se comportent à peu près de même. Il n'en est pas ainsi des terrains secondaires, dont la structure stratifiée est plus variée; parmi les couches qui les composent, il y en a qui sont formées de sable en partie désagrégé, perméable, et par conséquent très-favorable aux infiltrations. Il arrive quelquefois que ces terrains, en se relevant vers leurs extrémités, mettent à découvert, sur les flancs des montagnes,

des couches perméables ; les eaux pluviales y pénètrent donc par infiltration, et se rendent de là dans des bassins à fond non perméable. Suivant l'abondance des eaux, il se forme des ruisseaux, des rivières ou des fleuves souterrains dont les lits augmentent par l'enlèvement des sables et autres substances entraînées par les eaux. Le calcaire crayeux qui occupe la partie supérieure des terrains secondaires est sillonné dans tous les sens par de nombreuses fissures qui permettent aux eaux d'y pénétrer jusqu'à des profondeurs plus ou moins considérables.

Les terrains tertiaires sont également stratifiés; les couches sont séparées les unes des autres par des joints nets et bien tranchés; ils occupent le fond du bassin formé par les terrains secondaires. Leurs dépôts vers la limite de ce bassin sont également relevés, et présentent leurs flancs souvent formés de couches de sable. Il suit de là qu'il y a autant de nappes liquides souterraines qu'il y a d'étages distincts de couches sablonneuses interposées entre des couches imperméables; les infiltrations y sont donc du même ordre que dans les terrains secondaires. Les effets produits présentent de grandes différences dans les deux cas : dans les terrains secondaires, ils ont lieu sur une plus grande échelle que dans les terrains tertiaires, en raison de la prodigieuse épaisseur des couches, de leur alternance moins fréquente et de la force des cours d'eau inférieurs. Si les eaux qui s'infiltrent dans les sables ne trouvent que peu ou point d'obstacles pour se rendre dans les parties inférieures, il en résulte que la température de celles-ci est sans cesse abaissée.

Il arrive quelquefois aussi que les eaux servent à équilibrer les températures de deux terrains qui ne sont pas à la même profondeur; néanmoins ce ne sont là que des cas particuliers, car les eaux doivent être considérées comme donnant sensiblement la température des terrains. Si, à égalité de profondeur au-dessous de la couche invariable, on ne trouve pas toujours la même température dans les puits forés, cela tient à l'inégale

conductibilité des terrains; ainsi, plus un terrain est conducteur, moins la différence de température est grande à égalité de profondeur. Les observations suivantes mettent, du reste, ce fait en évidence.

PARIS. La température moyenne de Paris, à la surface du sol, est de...... + 10°, 8.

La température de la fontaine jaillissante de la gare de St-Ouen, à 66 mètres de profondeur..................... + 12°, 9.
D'où l'on déduit une augmentation de 1° pour 31^{m},90 à partir de la couche invariable.

La température du puits foré à l'abattoir de Grenelle, à 505 mètres de profondeur, a été déterminée avec six thermomètres à déversement de M. Walferdin garantis de la pression et laissés 7^{h} 30′ dans la vase boueuse. Tous ont indiqué avec un accord remarquable une température de........................ + 26°, 43.

La température moyenne à la surface étant de 10°,8, il en résulte que l'on a 1° d'augmentation pour 32^{m},24, au lieu de 31^{m},90 trouvés à la gare Saint-Ouen.

La température moyenne à la surface, dans les départements du Nord et du Pas-de-Calais, est d'environ............... + 10°, 3.

Celle de la fontaine artésienne de Marquette, à 56^{m} de profondeur......... + 12°, 5.

Il en résulte un accroissement de 1° pour 27^{m},4.

SHEERNESS. La température moyenne de la surface du sol, à l'embouchure de la Medway, dans la Tamise, est......... + 10°, 5.

La température du puits artésien à 110^{m}, est........................ + 15°, 5.
Accroissement de 1° pour 22 mètres.

TOURS. La température moyenne de la

surface est de. . . . . + 11°, 5.

La fontaine artésienne, à 140 mètres, donne . . . . + 17°, 5.
Accroissement de 1° par 22 mètres.

Dans le puits artésien de New-Salswerck, à la recherche d'une couche salée, l'accroissement de température a été trouvé de 1° par 29m.

On voit par là que les accroissements de la température avec la profondeur, déduites des observations faites dans les puits forés, ne conduisent à aucune loi précise; néanmoins, en comparant ensemble les nombreuses observations recueillies sur divers points du globe, on est conduit aux conséquences générales suivantes :

1° Au-dessous de la couche invariable, la température augmente avec la profondeur.

2° Le rapport entre l'accroissement de température et la profondeur varie d'un lieu à un autre dans des limites assez étendues, suivant la nature du sol et diverses causes qui ne sont pas encore toutes connues. Dans certaines localités, par exemple, on a 1° d'augmentation de température pour 14 ou 15 mètres de profondeur; dans d'autres, il faut aller jusqu'à 50 ou 60; mais, en moyenne, la température s'accroît de 1° pour 25 à 30 mètres. On admet en général le dernier nombre.

L'accroissement de température, sans aucun doute, continue jusqu'à de très-grandes profondeurs ; car en Chine, où l'on a porté très-loin l'art du forage, on est arrivé à des nappes d'eau jaillissantes dont la température est voisine de celle de l'ébullition; cette eau sert aux besoins de la population. La distribution s'en fait dans les habitations au moyen de tuyaux de bambou.

En admettant que cette eau n'ait seulement que 60° de température, et que la loi d'accroissement de chaleur fût la même que dans nos climats, il s'ensuivrait que la nappe d'eau serait située à plus de 1000 mètres audessous du sol.

Les faits qui viennent d'être rapportés mettent en évidence l'accroissement de température à mesure que la profondeur devient plus considérable, et confirment les idées que nous avons émises touchant l'origine ignée de la terre, une portion de la chaleur primitive s'étant dissipée peu à peu par l'effet du rayonnement dans les espaces célestes. Nous allons indiquer maintenant les recherches analytiques qui ont été faites pour connaître l'état actuel du refroidissement du globe.

§ II. *Vues théoriques sur la chaleur centrale.*

A l'époque actuelle, et depuis même un assez grand nombre de siècles, d'après les observations astronomiques et diverses considérations de culture, la température de la terre paraît à peu près stationnaire, ou du moins la marche du refroidissement est devenue tellement lente, qu'elle ne pourra être sensible que dans un avenir très-éloigné. Ce ralentissement doit être attribué à l'épaisseur actuelle de la croûte solide, que l'on évalue en moyenne à environ 40 kilomètres, ainsi qu'à sa mauvaise conductibilité. La partie située au-dessous de cette croûte doit se trouver dans un état de fusion ou d'incandescence.

En partant de cette donnée, qui est aujourd'hui bien établie, que la température terrestre va continuellement en augmentant depuis la couche invariable jusqu'aux plus grandes profondeurs où l'homme soit parvenu, d'environ 1° centigrade par 30 mètres, on arriverait, en suivant cette progression, à ce résultat, que le centre de la terre aurait une température de 200000°; mais on ne saurait admettre *à priori* cette progression, attendu que si le noyau ou plutôt l'intérieur du globe est à l'état de liquéfaction, les différences de température entre les diverses couches sont très-faibles. Quoi qu'il en soit, la chaleur centrale doit être très-considérable.

Poisson n'adopte pas cette chaleur centrale, tout en ad-

mettant les états successifs gazeux, liquides et solides, par lesquels ont passé les substances composant la croûte terrestre, et pense que la solidification s'est opérée au centre du globe de la manière suivante : la surface s'étant refroidie d'abord, les premières parties solides se sont précipitées dans la masse liquide jusqu'au centre; d'autres les ont remplacées, et ainsi de suite. Il suppose encore que la compression énorme sous laquelle se trouvaient les parties inférieures a dû concourir à la solidification de quelques portions qui étaient à une température bien supérieure à celle où cette solidification aurait eu lieu à la surface. Suivant cette manière de voir, le centre de la terre aurait actuellement perdu presque toute sa chaleur d'origine. Quant à l'accroissement progressif de la chaleur au-dessous de la couche invariable, Poisson en rend compte comme il suit : La terre, dans le mouvement de translation du système solaire, a dû traverser successivement des régions de l'espace où la température était très-élevée et d'autres où elle l'était moins. Dans les premières, la terre s'est échauffée jusqu'à une certaine profondeur; dans les secondes, elle a perdu peu à peu une partie de la chaleur acquise. Dans le premier cas, la température devait paraître décroissante de la surface au centre, et dans le second cas croissante. A l'époque actuelle, d'après cette hypothèse, la terre se trouverait dans un espace dont la température serait moins élevée que celle des régions parcourues antérieurement.

Cette théorie a été invoquée dans ces derniers temps pour expliquer plusieurs faits géologiques qui tendent à prouver que des glaciers ont descendu plus bas, dans certaines localités, qu'ils n'auraient dû le faire si la terre eût été dans un état continuel de refroidissement. Néanmoins elle n'a pas reçu l'approbation des physiciens, qui admettent tous dans la masse du globe une chaleur d'origine dont les volcans et les eaux thermales attestent l'existence.

Rien ne montre, du reste, que la partie centrale de

la terre, quoique incandescente, soit à l'état liquide; la haute pression à laquelle cette partie est soumise doit modifier singulièrement l'état physique des matières qui s'y trouvent. Il a dû aussi se passer dans les premiers âges du refroidissement de la terre des phénomènes analogues à ceux que l'on observe lors de la congélation de l'eau dans les rivières; des parties de la masse, en se solidifiant, ont peut-être augmenté de volume, et alors leur précipitation dans les régions inférieures est devenue impossible. Quant aux espaces dans lesquels la terre a pu s'échauffer ou se refroidir, rien ne s'oppose à ce qu'il en ait été ainsi, car on ignore si la température est la même dans les diverses régions que parcourt le système solaire.

Il est donc admis aujourd'hui que le globe terrestre conserve encore une portion de sa chaleur primitive, qui ne se dissipe que très-lentement dans les espaces célestes, en raison de l'épaisseur et du peu de conductibilité de la croûte solide. La déperdition de la chaleur terrestre a été tellement faible, qu'aucun effet sensible n'a pu être produit depuis les temps historiques; s'il en eût été autrement, le volume de la terre aurait diminué, son mouvement de rotation autour de son axe aurait augmenté, et la durée du jour sidéral ne serait plus la même que jadis. (*Annuaire du bureau des longitudes*, 1834, p. 181.) Or, deux cents ans avant notre ère, on a déterminé le mouvement propre de la lune en fonction du jour sidéral, et l'on trouve aujourd'hui que l'arc parcouru par notre satellite en fonction de ce jour est le même qu'il y a deux mille ans. La température moyenne du globe depuis cette époque n'a donc pas changé sensiblement.

Nous n'avons encore que des idées générales sur la succession des phénomènes calorifiques de la terre depuis sa formation : aussi sommes-nous dans l'impossibilité de résoudre les questions relatives aux époques depuis lesquelles elle a commencé à se solidifier à sa surface et à se couvrir de corps organisés. Si l'on pouvait déterminer la vitesse du refroidissement dans un lieu

quelconque, ou bien l'abaissement de température après un certain laps de temps, la théorie du rayonnement donnerait le nombre de siècles écoulés depuis que la terre a commencé à se refroidir; mais comme on n'a pu constater nulle part jusqu'ici aucun changement dans la température moyenne, en supposant que l'état du sol soit resté le même, il en résulte que l'on n'a aucun élément pour résoudre cette haute question de philosophie naturelle.

Fourier est le premier qui ait abordé théoriquement le refroidissement de la terre sous son véritable point de vue, en s'appuyant sur les principes suivants, relatifs aux causes d'où dérive la chaleur du globe :

1° La terre est échauffée par les rayons solaires, dont l'inégale distribution produit la diversité des climats.

2° La chaleur du globe participe à la température commune des espaces planétaires, puisqu'elle est exposée à l'irradiation des astres innombrables qui environnent de toutes parts le système solaire.

3° La terre conserve encore une portion de la chaleur centrale primitive qu'elle possédait lors de la formation des planètes, et la perd progressivement et très-lentement.

Passons successivement en revue chacun de ces trois ordres de phénomènes.

L'action solaire produit deux mouvements de chaleur bien distincts : le premier transmet la chaleur solaire au-dessous et au-dessus de la surface terrestre, d'où résulte en partie les alternatives des saisons. Ce mouvement s'étend dans la terre jusqu'à une certaine profondeur où se trouve la couche invariable; il est périodique, et n'affecte que l'enveloppe. Le second mouvement est uniforme et d'une extrême lenteur; il consiste dans un flux continuel toujours semblable à lui-même, traversant la masse du globe, ou du moins une partie de sa surface de l'un et de l'autre côté du plan de l'équateur jusqu'au pôle. La chaleur solaire ne s'accumule donc pas dans l'intérieur de la terre; elle n'a

plus d'autre effet que d'y maintenir l'inégalité des climats et les alternatives des saisons. Nous indiquerons plus loin son évaluation et ses causes de déperdition.

La température stellaire, qui n'est autre que celle des espaces célestes, est due au rayonnement de tous les astres; elle n'est probablement pas la même dans toutes les régions de l'univers. Cette température est celle qu'indiquerait un thermomètre, si le soleil n'existait pas, et qu'il fût placé au centre de l'espace occupé par cet astre. La surface de la terre se trouve donc entre une masse centrale, dont la température peut surpasser celle des matières incandescentes, et une enceinte immense dont la température, suivant Fourier, peu différente de celle des pôles, est inférieure à — 50°, ou — 60° (1).

Si la terre avait perdu toute sa chaleur d'origine et qu'elle ne reçût plus de chaleur du soleil, l'atmosphère et la terre rayonneraient dans l'espace, jusqu'à ce que l'un et l'autre se fussent mis en équilibre avec la température des espaces planétaires; si la chaleur stellaire n'existait pas, on pourrait arriver au froid absolu. Mais de même que le repos absolu de la matière n'existe pas dans la nature, de même aussi il est bien difficile de concevoir le froid absolu; car, dans ce cas, toutes les molécules seraient en contact. La chaleur ne se perd pas, et si les corps célestes se refroidissent, ils tendent à se mettre en équilibre de température. Uranus, et à plus forte raison la planète Le Verrier, à cause de leur distance au soleil et du peu de rayons qu'elles reçoivent de cet astre, doivent se trouver à peu près dans le cas de la terre supposée au milieu de l'enceinte des espaces planétaires avec leur température

(1) Le 17 janvier 1834, le capitaine Back a vu le thermomètre descendre jusqu'à — 56° au fort Reliance (latitude 62° 46′ 5″). Ce n'est là qu'une limite supérieure pour la température des espaces célestes, car on verra plus loin que, suivant les lois de l'absorption des rayons calorifiques par les substances diathermanes, la température des pôles est peut-être plus élevée que celle de l'espace.

propre. Le froid y est donc aussi intense que dans nos régions polaires.

Quant à la chaleur d'origine, la terre en conserve encore une partie, et l'excès de la température de la surface du globe sur celle qu'elle aurait si la chaleur centrale n'existait pas, a une relation nécessaire avec l'accroissement de température à différentes profondeurs. En supposant que la terre ait la même conductibilité que le fer et que l'accroissement fût de 1° par 30 mètres, il s'ensuivrait, d'après Fourier, que la chaleur centrale primitive élèverait actuellement de 1/4 de degré environ la température de la surface : or, comme de Saussure a trouvé que la conductibilité de la terre ne peut pas être évaluée approximativement à plus de 1/9 de celle du fer, il faut en conclure que la chaleur centrale n'élève pas la température de sa surface de 1/36 de degré audessus de ce qu'elle doit être, sous l'influence des rayonnements solaire et stellaire.

La chaleur centrale n'a donc plus qu'une influence excessivement faible sur l'état calorifique de la surface de la terre; et en supposant que le soleil n'éprouvât aucun changement dans sa constitution physique, l'état actuel différerait très-peu de celui auquel notre globe devrait parvenir.

D'après ce qui précède, on voit que pour appliquer rigoureusement à notre planète les lois de la propagation de la chaleur, il faudrait connaître la nature des substances qui se trouvent dans l'intérienr de la terre, leur capacité calorifique et la conductibilité des couches superposées. Il faudrait savoir aussi quelles sont les combinaisons chimiques qui s'opèrent dans les parties centrales, sous une pression aussi excessive que celle à laquelle elles sont soumises, ainsi que les phénomènes qui ont lieu à la surface de séparation de la masse liquide et de la croûte solide.

Bien que la diminution de la chaleur centrale soit excessivement lente, il ne faut pas croire toutefois que, vu l'état de la surface, il ne s'en perde pas sensible-

ment dans les espaces célestes : suivant une expérience de Saussure, citée par Fourier, cette perte, dans l'intervalle d'un siècle, serait égale à celle qui fondrait un prisme de glace de même base que la surface terrestre et de trois mètres de hauteur. Si ce résultat était exact, il prouverait que, bien que les variations de température à la surface de la terre, relatives à la chaleur centrale, et le changement de volume du globe, fussent insensibles, néanmoins la quantité de chaleur d'origine qui se perd serait appréciable. Pour donner une idée de la limite au-dessous de laquelle il faut placer la variation de température de la surface du globe, nous ajouterons que, d'après le nombre énorme de siècles écoulés depuis l'origine du refroidissement, on ne peut pas l'évaluer au-dessus de $\frac{1}{57600}$ de degré centigrade par siècle. Ainsi, depuis l'école d'Alexandrie jusqu'à ce jour, la chaleur centrale, en se dissipant dans l'espace, n'a pas fait éprouver à la surface terrestre un abaissement de température égal à $\frac{1}{2880}$ de degré. Quant à la température climatérique d'un pays, elle varie en vertu de causes que nous ferons connaître ultérieurement.

Dans la suite des siècles, comme l'a fait remarquer Herschel, le soleil pourrait bien occasionner d'autres inégalités dans la température de la surface terrestre, si l'excentricité de l'orbite terrestre devenait les $\frac{35}{100}$ du demi-grand axe; dans ce cas, pendant certains jours de l'été, le soleil échaufferait trois fois autant qu'actuellement. Cette circonstance n'arrivera peut-être jamais.

En résumé, nous voyons que le globe terrestre, enveloppé de son atmosphère et isolé au milieu de l'espace, est exposé à l'irradiation du soleil et des astres innombrables qui sont à des distances énormes de nous. La chaleur solaire a cessé de s'y accumuler; elle n'y pénètre plus qu'à une petite profondeur, pour y maintenir l'inégalité des climats et les alternatives des saisons. Si l'état physique du soleil restait le même, l'état calorifique de la terre éprouverait peu de changement. Mais cette supposition n'est guère admissible;

il est probable, au contraire, qu'il se refroidit comme tous les corps célestes, et qu'il en sera ainsi jusqu'à ce que cet astre ait pris la température de l'espace.

§ III. *Quantité de chaleur envoyée par le soleil; température des espaces planétaires.*

On a vu que la chaleur centrale du globe n'avait plus d'influence sensible sur l'état calorifique de la surface; il résulte de là que depuis la couche invariable jusqu'à la surface du sol la température n'est plus influencée que par l'irradiation solaire. Si la quantité de chaleur reçue par chaque lieu de la surface de la terre ne dépendait que de la position géographique de ce lieu, la température de l'écorce irait en diminuant régulièrement de l'équateur aux pôles, et serait liée au mouvement de translation de la terre autour du soleil et à l'inclinaison du plan de l'équateur sur le plan de l'orbite terrestre. On pourrait donc, d'après la position apparente du soleil et l'épaisseur de l'atmosphère supposée partout également transparente, calculer la quantité de chaleur déversée à chaque instant sur les différents points du globe. La distribution de la température n'est pas soumise à une semblable régularité. Une foule de causes interviennent dans la répartition de la chaleur à la surface du globe; ce sont : les vents, les courants marins, le voisinage des mers, la transparence de l'atmosphère, l'élévation du sol, et d'autres effets secondaires qui doivent être pris en considération dans la classification des climats, dont il sera question dans les chapitres suivants.

Occupons-nous, avant d'exposer la distribution de la chaleur à la surface du globe, de l'évaluation approximative de la quantité de chaleur émanée du soleil et de celle qui est reçue annuellement par la terre.

L'atmosphère joue un rôle important dans la répartition de la chaleur rayonnante : de même que les corps transparents, cette enveloppe gazeuse absorbe une por-

tion des rayons calorifiques émanés du soleil ; elle tempère l'action de la chaleur par cette absorption, et empêche que la portion de la terre privée momentanément de la présence du soleil pendant la nuit, ne soit exposée à un froid considérable, par suite du rayonnement calorifique dans l'espace.

On a donc dû chercher, pour remonter à la quantité de chaleur émanée du soleil, quelle était la partie du rayonnement ainsi absorbée par l'atmosphère, et s'il était possible de connaître l'élévation de température qui résulterait de la suppression momentanée de cette masse gazeuse dans le lieu où se trouve l'observateur.

De Saussure a construit, à cet effet, un instrument appelé hélio-thermomètre, composé d'un thermomètre placé dans une enceinte noircie, laquelle est terminée d'un côté par des lames de verre parallèles. On oriente cet instrument de façon que les rayons viennent frapper perpendiculairement les lames de verre, et on l'expose momentanément, pendant des temps égaux, à l'action des rayons calorifiques, lorsque le soleil est à diverses hauteurs. M. Herschel, qui s'est aussi occupé de cette question, a fait usage d'un appareil analogue qu'il a appelé actinomètre. Enfin M. Pouillet, dans l'étude de ces phénomènes, s'est servi de plusieurs appareils qu'il a nommés pyrhéliomètres, qui l'ont conduit à des résultats dont nous allons exposer rapidement les principales conséquences.

Le pyrhéliomètre direct (planche I, fig. 4) est un vase en argent AB, à minces parois, noirci sur sa face supérieure afin d'avoir un pouvoir absorbant maximum, et contenant environ 100 grammes d'eau. Cet appareil est orienté de façon à recevoir l'action directe du soleil. Un thermomètre, *ab*, dont la tige, passant dans le support CD du vase d'argent, est garantie de l'action solaire par l'appareil même, donne les variations de température. La disposition de l'appareil est telle que AB soit placé perpendiculairement à la direction des rayons

incidents; à cet effet on s'arrange de façon que l'ombre de AB soit projetée sur un écran A'B' de même grandeur.

On opère comme il suit : l'eau étant à la température ambiante, on tient l'appareil à l'ombre, très-près du lieu où l'on veut expérimenter; on le dispose de manière qu'il voie la même étendue du ciel sans recevoir les rayons solaires, et pendant quatre minutes on note de minute en minute son réchauffement ou son refroidissement. On le place ensuite derrière un écran pendant la minute suivante, et on l'oriente de nouveau de façon que les rayons solaires puissent arriver perpendiculairement; on enlève l'écran à la fin de la cinquième minute. Alors, pendant cinq minutes, on note de minute en minute le réchauffement, qui devient très-rapide, et l'on agite continuellement l'eau. On replace l'écran à la fin de la cinquième minute, on remet l'appareil dans la première position, et on observe encore le refroidissement pendant cinq minutes. L'élévation de température t, dû aux cinq minutes de l'action solaire, est donc :

$$t = e + \left(\frac{r + r'}{2}\right),$$

e étant l'élévation de température de l'appareil pendant les cinq minutes de l'exposition au soleil, et r, r' les refroidissements observés pendant les cinq minutes qui ont précédé et suivi cette exposition.

Le pyrhéliomètre à lentilles se compose d'une lentille dont la distance focale est de 60 à 70 centimètres, et au foyer de laquelle se trouve un vase d'argent contenant environ 600 grammes d'eau. La forme du vase et la disposition de la lentille sont telles que, pour une hauteur quelconque du soleil, les rayons tombent perpendiculairement sur la lentille et sur la face du vase sur laquelle se trouve le foyer. On opère avec cet appareil comme avec le précédent : seulement, il est employé de préférence à ce dernier quand il fait du

vent. (Voyez, pour plus de détails, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tome VII.)

En déterminant les élévations de température aux diverses heures de la journée, lorsque les rayons solaires ont agi pendant 5′, on trouve des nombres fort différents pour les quantités de chaleur absorbées, en raison de l'épaisseur inégale de l'atmosphère traversée par les rayons. Si l'on compare les résultats, on trouve que les élévations de température sont assez bien représentées par la formule :

$$t = A p^{\varepsilon},$$

dans laquelle t désigne la température, ε l'épaisseur de la couche atmosphérique, A et p deux constantes (1). La première constante A est indépendante de l'état de l'atmosphère; la seconde p, varie le même jour et d'un jour à l'autre suivant la sérénité de l'air. A est donc la constante solaire qui contient, comme élément, la puissance calorifique du soleil, et p la constante atmosphérique qui renferme le pouvoir de transmission variable dont est douée l'atmosphère; on trouve que

$$A = 6^{\circ},72.$$

Cette valeur est obtenue en faisant $\varepsilon = 0$, ou $p = 1$, c'est-à-dire en supposant que la couche d'air soit zéro, ou bien qu'elle ait un pouvoir de transmission absolu et n'absorbe rien. p varie entre 0,72 et 0,79.

En représentant par 1 l'intensité d'un rayon émané du soleil et tombant sur l'atmosphère, l'épaisseur restant la même et égale 1, alors la quantité de chaleur

---

(1) ε l'épaisseur de la couche atmosphérique aux différentes heures de la journée, est donnée par la formule :
($\varepsilon = \sqrt{R^2 \cos^2 \alpha + 2 R h + h^2} - R \cos \alpha$), α étant la hauteur zénithale du soleil, h la hauteur de l'atmosphère, et R le rayon terrestre. On prend dans cette formule $h = 1$ $R = 80$.

absorbée par celle-ci est par $1-p$; il résulte de là que dans le trajet vertical des rayons venant du zénith, l'atmosphère absorbe au moins les $\frac{21}{100}$ et au plus les $\frac{23}{100}$ de la chaleur incidente.

Si l'on cherche, la terre étant en T et le soleil en S (fig. 5), quelle est la quantité de chaleur reçue sur la partie éclairée de la terre AMC, et la portion absorbée dans le cylindre A*xyz*C de l'atmosphère, une partie des rayons étant oblique, on trouve qu'à chaque instant, sur l'hémisphère éclairé par le soleil, la partie de la chaleur qui arrive au sol est comprise entre 0,5 et 0,6, et celle qui est absorbée est comprise entre 0,5 et 0,4, mais bien près de 0,4; la terre ne reçoit donc, par suite de la présence de l'atmosphère, que la moitié à peu près de la chaleur émanée du soleil.

En ayant égard à la capacité calorifique du pyrhéliomètre, on trouve pour la quantité de chaleur envoyée par le soleil, sur un centimètre carré de la surface terrestre, mais indépendamment de l'action absorbante de l'air:

1,7633 en une minute.

Il résulte dans cette hypothèse que la quantité totale de chaleur que recevrait la terre en un an serait, sur chaque centimètre carré, de

231675 unités de chaleur.

Cette quantité de chaleur étant transformée en glace fondue, serait capable de fondre une couche de 29 mètres 3 décimètres de glace répandue sur toute sa surface. En réalité, par suite de la présence de l'atmosphère, il n'y a que la moitié de cette chaleur reçue sur le globe.

Ainsi la quantité de chaleur que reçoit la surface terrestre en un an, de la part du soleil, est capable de fondre une couche de glace de 15 mètres d'épaisseur répartie uniformément sur la terre.

4

Puisque les 231675 unités représentent la quantité de chaleur émanée du soleil S, et répartie dans le cône ASC (fig. 6), il est facile d'en conclure la quantité totale de chaleur émanée de S, connaissant l'angle ASC; on trouve alors, d'après la distance de la terre au soleil et le diamètre de ce dernier, que cet astre émet, par minute et par chaque centimètre carré de sa surface,

84888 unités de chaleur.

Ce qui revient à dire que la quantité de chaleur émanée du soleil en une minute fondrait une couche de glace qui envelopperait cet astre et qui aurait 11 mètres 2 décimètres d'épaisseur; ou bien que cette chaleur fondrait en un jour une couche de glace de quatre lieues d'épaisseur.

On peut même faire une autre conjecture : supposons un instant que la chaleur émanée du soleil fît baisser sa température et qu'il n'ait pas la faculté de renouveler cette perte; en un an, l'abaissement de température, d'après les nombres précédents et la masse du soleil, serait

$$\frac{4}{3c},$$

c étant la chaleur spécifique du soleil, son pouvoir conducteur étant supposé parfait.

La solution de ce problème dépend de deux éléments qui seront toujours inconnus, savoir, la capacité calorifique du soleil, et son pouvoir conducteur; on ne peut former que des suppositions à cet égard. Si l'on admet que, dans l'astre autour duquel nous gravitons, les choses se passent comme actuellement à la surface de la terre, et que sa chaleur spécifique soit celle du liquide qui a la plus grande capacité calorifique, l'eau; dans ce cas, $c=1$, et on aurait en un an, pour l'abaissement de température du soleil, 1°,3 ou 133° par siècle. Ce nombre est évidemment trop fort; il en résulte que c est trop petit, ou que le nombre donné pour la quan-

tité de chaleur émanée du soleil est trop grand, à moins toutefois que cet astre ait la faculté de renouveler sa chaleur à mesure qu'elle est émise dans l'espace. Cette question exige donc de nouvelles recherches continuées d'année en année pendant un très-long laps de temps.

M. Pouillet a cherché également à évaluer la quantité de chaleur envoyée par l'ensemble de tous les astres, et la température de l'espace dans lequel se trouve actuellement le système solaire. Il a donné 142° au-dessous de zéro pour la température des espaces planétaires, nombre qui est bien inférieur à — 60° qu'admettait Fourier. Nous renvoyons au travail cité plus haut pour de plus amples renseignements; nous énoncerons seulement les conséquences suivantes qui résultent du principe de l'équilibre de température des corps placés dans des enveloppes diathermanes.

1° La température de la surface de la terre est plus élevée que celle de l'espace.

2° La température moyenne de l'atmosphère est supérieure à la température de l'espace et inférieure à celle de la terre.

3° Le décroissement de température de l'atmosphère ne provient pas d'une action périodique du soleil ni des courants ascendants et descendants que cette action peut déterminer à la surface de la terre; il est une des conditions d'équilibre des enveloppes diathermanes, et est dû au rayonnement de l'atmosphère et aux actions absorbantes inégales que l'air exerce sur les rayons de chaleur venant de l'espace et sur ceux qui sont émis par la terre.

Poisson était déjà parvenu à cette conséquence, que les dernières couches de l'atmosphère devaient être à une température bien inférieure à celle de l'espace, et telle que le froid leur ait fait perdre toute leur élasticité.

Les méthodes expérimentales dont nous venons de parler sont rationnelles, mais les nombres obtenus pourront être modifiés par des expériences ultérieures. C'est un sujet très-digne de l'attention des physiciens.

SECTION III.

Phénomènes dépendant de la chaleur centrale.

Tous les phénomènes qui ont pour origine la chaleur centrale, sont nécessairement liés entre eux par une dépendance mutuelle : tels sont les eaux thermales, les volcans, les tremblements de terre, le remplissage des filons par sublimation; et peut-être faut-il y joindre encore les mouvements que l'on a remarqués dans quelques contrées, et qui indiquent un exhaussement ou un abaissement du sol. Nous croyons convenable de décrire ces phénomènes, du moins les principaux, avant d'exposer les effets calorifiques que l'on observe à la surface du globe.

§ I. *Des eaux thermales et des émanations gazeuses.*

Les eaux qui coulent à la surface de la terre tiennent en général peu de matières en dissolution, et leur température participe de celle du sol; celles qui proviennent d'une profondeur plus ou moins grande sont chaudes ou froides et chargées de différents sels. Nous ne nous occuperons ici que des eaux dont la température est plus élevée que la moyenne du lieu, et appelées, en raison de cela, *eaux thermales;* attendu que nous ne considérons dans ce chapitre que les faits qui peuvent nous éclairer sur la chaleur centrale.

Les eaux pluviales et autres s'infiltrent à travers les fissures des roches jusqu'à de grandes profondeurs, où elles se mettent naturellement en équilibre de température avec les parties environnantes. Dans leur trajet, elles se chargent de substances solubles, et reparaissent ensuite à la surface avec une température élevée, soit par suite d'une différence de niveau, soit par la pression des gaz qui accompagnent souvent les eaux thermales, soit par la tension de la vapeur d'eau elle-même. Il pourrait se faire que des réactions chimiques analogues à celles qui ont oxydé primitivement la couche

superficielle du globe contribuassent aussi à leur élévation de température; mais on ne sait rien de positif à cet égard.

Lorsque la croûte terrestre n'avait encore que peu d'épaisseur et que sa température était plus élevée qu'elle n'est aujourd'hui, les eaux thermales étaient plus abondantes et contenaient plus de matières salines en dissolution. Les preuves de la diminution des eaux thermales et même du changement de matériaux déposés par elles, se trouvent, suivant M. Lecoq (*Éléments de Géologie*, t. II, p. 63), dans les masses de travertin que l'on rencontre en différents points du globe et dont les sources qui les ont produites sont taries, ou qui n'abandonnent plus à la longue que des couches minces et limitées de carbonate de chaux.

La masse calcaire sur laquelle la ville de Wichy est construite a été formée par la source des Célestins; aujourd'hui les fontaines ne fournissent plus qu'une faible quantité de cette substance. Les eaux du Mont-Dore ont amené jadis des masses de silice; à l'époque actuelle, à peine si elles en renferment. A Saint-Nectaire, les eaux ont déposé d'abord de l'arragonite, puis de la silice, de l'ocre très-friable, et enfin du travertin qu'elles déposent encore maintenant.

Les phénomènes relatifs aux eaux minérales ne sont donc plus que de faibles manifestations de ceux qui ont été produits dans les premiers âges du monde. La grande quantité de ces eaux qui surgissaient alors de l'intérieur, coulaient à la surface et ravinaient la terre, concouraient ainsi à la formation des terrains de sédiment. En raison de leur température élevée, elles étaient plus corrosives et plus chargées de substances salines qu'à l'époque actuelle.

La température des eaux thermales varie depuis quelques degrés au-dessus de la moyenne du lieu jusqu'aux environs de celle de l'ébullition.

En Europe, parmi les principales sources thermales nous citerons,

En France : Température.

Les eaux de Chaudes-Aigues marquent 88°
Les eaux de Dax (Landes)........... 60°
Mont-Dore...................... 44°
Wichy.......................... 40°
Bourbonne.............. au delà de 50°

En Bohême, celles de Carlsbad vont jusqu'à........................... 73°

En Angleterre, il existe peu de sources thermales.

En Asie et en Amérique, il y en a un grand nombre. Près de Valencia, M. de Humboldt a trouvé une source marquant.......................... 90°

On admet que la température des eaux thermales doit être d'autant plus élevée qu'elles viennent de lieux plus profonds; mais aussi elle doit s'abaisser d'autant plus que les conduits qui les amènent à la surface sont plus longs. M. Boussingault a essayé de déterminer cette influence par des observations directes; il a rencontré en effet, en Amérique, trois sources dont les eaux, qui s'élevaient à des hauteurs différentes, avaient des températures d'autant plus basses qu'elles étaient plus élevées. La source de Trincheras, près Puerto-Cabello, presqu'au niveau de la mer, a donné.... 97°

La source de Mariana à 676m.... 64°
La source d'Onoto... à 702m.... 44°,5

En général, les eaux les plus abondantes sont les plus chaudes, probablement parce que leur plus grand volume empêche leur prompt refroidissement.

Les eaux thermales sortent de tous les terrains; on en voit surgir du milieu des fleuves et même de la mer, comme le Rhône près de Saint-Maurice en Valais, et plusieurs points du golfe de Naples nous en offrent des exemples. Souvent il arrive que les matières en dissolution dans les eaux thermales n'ont aucun rapport avec les roches qu'elles traversent; elles ont donc leur origine ailleurs que dans ces terrains.

On peut, du reste, déduire les conséquences suivantes

des observations relatives aux eaux minérales chaudes : Les eaux des terrains primordiaux sont presque toujours thermales, et possèdent en général une température élevée. Les eaux des terrains de sédiments, tant inférieurs que moyens, participent des propriétés des eaux inférieures; rien ne prouve néanmoins qu'elles ne proviennent pas, comme celles-ci, des terrains primordiaux; il peut se faire que leur long trajet ait contribué à abaisser leur température.

Les grandes variations de température à la surface terrestre, ainsi que les longues sécheresses et les pluies abondantes, qui influent notablement sur les sources ordinaires, font peu varier les sources thermales; les tremblements de terre y apportent quelquefois des changements. On a vu des sources thermales disparaître; d'autres, devenir plus froides ou plus chaudes: changements qui n'ont été souvent que momentanés. Des sources de Carlsbad perdirent, il y a un certain nombre d'années, une partie de leur chaleur à la suite d'un tremblement de terre, tandis que la source de la Reine, à Bagnères de Luchon, acquit par la même cause une augmentation de température.

Nous avons dit qu'il existait des sources thermales dont les eaux arrivaient à la surface avec des températures voisines de l'ébullition; mais comme les eaux qui viennent d'une certaine profondeur supportent, quand elles sont jaillissantes, la pression d'une atmosphère par 10 mètres d'eau à peu près, ou 100 atmosphères par 1060 mètres, il en résulte qu'au-dessous du sol leur température peut être supérieure à 100°; aussi, en arrivant à la surface peuvent-elles émettre immédiatement de la vapeur. Il y a alors bouillonnement et même projection de liquide. On doit rapporter à cette cause les Geysers de l'Islande, immenses jets d'eau qui peuvent avoir jusqu'à 6 mètres de largeur et 50 mètres de hauteur. Près de la ville de Skalholt, le nombre de ces jets d'eau s'élève à plus de 100 dans une circonférence de deux tiers de lieue. Leurs éruptions sont soumises

à des intermittences, et l'on peut les considérer comme celles de petits volcans d'eau. Suivant M. Lottin, la température du grand Geyser serait de 124° à 20 mètres de profondeur; celle du Strok de 111° à 13 mètres, et celle d'un autre petit orifice à fleur de terre, de 101°. La silice qui se rencontre dans beaucoup de sources thermales n'est nulle part aussi abondante que dans les Geysers.

Il faut rapporter probablement à la même cause que ces immenses jets d'eau, les lagonis de Toscane, espèces de petites mares dans lesquelles l'eau bouillonne par la sortie de vapeurs à travers les fissures des roches. Ces vapeurs, dont la température est très-élevée, sont chargées ordinairement d'acide borique qu'elles déposent en se liquéfiant. La température des vapeurs des lagonis ne dépasse pas 70°.

Dans des eaux minérales ordinaires, on aperçoit quelquefois un bouillonnement en temps d'orage, qui est attribué à la diminution de pression de l'atmosphère; il y a alors dégagement de vapeur, d'acide carbonique ou d'autre gaz.

Le volume fourni par une source est très-variable. Les unes, semblables aux sources de Chaudes-Aigues, qui versent 250 litres à peu près par minute, ne donnent pas un volume d'eau très-considérable; d'autres sont tellement abondantes qu'elles forment à leur sortie de terre de véritables rivières, comme MM. de Humboldt et Boussingault l'ont observé en Amérique. Presque toutes sont intermittentes, et donnent lieu à de violents dégagements de gaz, auxquels on attribue les roulements souterrains qui précèdent quelquefois la sortie de l'eau.

Quoiqu'il existe des eaux thermales très-pures, néanmoins leur composition est en général fort complexe. Voici les principales substances qu'elles renferment :

1° L'oxygène, l'azote et l'hydrogène;

2° Le fer, le cuivre et le manganèse à l'état de sels; le soufre, l'iode et le brôme à l'état de combinaison;

3° Les acides carbonique, sulfureux, sulfurique, chlorhydrique, azotique, sulf-hydrique, borique, phos-

phorique, fluorique; il faut encore y joindre l'acide silicique;

4° La soude, la potasse, rarement;

5° Des sulfates, des sulfures, des hypo-sulfites, des chlorures, des azotates et des carbonates.

Quelques eaux thermales, comme celles de Baréges, renferment des matières organiques, ce qui prouve que la matière peut s'organiser à une température élevée. Ce point est important à considérer en ce qui concerne l'apparition des corps organisés sur la terre.

Il existe quelquefois dans certaines localités de simples émanations gazeuses formées de gaz hydrogène carboné, ou de gaz acide carbonique. Les premières donnent naissance aux fontaines ardentes ou aux feux naturels: en France, il en existe une dans l'Isère; dans l'État de Modène on en compte onze; on en trouve dans presque toutes les parties du monde, particulièrement en Chine, où on les utilise pour l'éclairage et le chauffage. La température de ces courants gazeux, dont la vitesse est en général peu considérable, est sensiblement plus élevée que celle de l'atmosphère.

Nous citerons comme exemple d'émanation d'acide carbonique, la grotte du Chien, près de Pouzolle, dans le royaume de Naples. On a cherché à expliquer la production de ce gaz par la réaction du proto-sulfate de fer résultant de la décomposition des pyrites, sur le carbonate de chaux; mais ce n'est là encore qu'une conjecture que des observations ultérieures pourront éclaircir.

Il s'échappe encore quelquefois de la terre d'autres substances, telles que du pétrole, de l'acide borique, du soufre, etc., et même de l'air atmosphérique provenant de masses gazeuses entraînées par les courants d'eau souterrains.

Tels sont les phénomènes généraux que présentent les eaux thermales. Il n'a pas été fait mention des eaux minérales proprement dites et des eaux de sources, attendu qu'elles proviennent de localités dont la température participe de celle de la surface de la terre.

§ II. *Des phénomènes volcaniques.*

Les signes avant-coureurs d'une éruption volcanique sont en général un bruit souterrain semblable à celui du canon ou à un fracas de voitures roulant sur le pavé; des tremblements de terre, et assez fréquemment des changements dans l'état de la température. L'éruption commence ordinairement par une colonne épaisse de fumée qui s'élève à une hauteur prodigieuse, et qui finit, lorsqu'elle n'a plus de vitesse de projection, par se refouler sur elle-même, de manière à former une série de sphères de vapeurs aqueuses; ces espèces de cumulus, en se condensant par le froid des régions supérieures, retombent en pluies abondantes accompagnées de violentes décharges électriques. Bientôt après, il sort du cratère avec une vitesse excessive des pierres incandescentes et une énorme quantité de cendres d'une telle ténuité, qu'elles peuvent être transportées à des distances considérables par les vents. Les cendres ne retombent pas toujours sèches sur le sol; elles sont fréquemment pénétrées de vapeurs aqueuses. Des laves en ignition arrivent ensuite. Ces laves proviennent de substances liquéfiées dans les foyers volcaniques, et sont lancées en dehors par la force expansive des fluides élastiques qui se dégagent dans les mêmes foyers. Leur surface est agitée par de forts bouillonnements d'où s'échappent des gaz et de la fumée bleuâtre due à la volatilisation du sel marin et d'autres substances. Les laves, en sortant par les bords du cratère, suivent les directions les plus favorables que le terrain leur présente. Au contact de l'air, leur surface, en se refroidissant, se solidifie, et la matière continue à couler en dessous, jusqu'à ce qu'un obstacle se présente; alors elle s'y arrête, s'amoncelle et finit par monter sur la partie solidifiée, puis continue son cours comme auparavant, jusqu'à ce qu'elle soit arrêtée par un nouvel obstacle. Il arrive souvent que la matière s'accumulant dans certains endroits, conserve de la chaleur pen-

dant si longtemps, en raison de sa mauvaise conductibilité, que Dolomieu assure l'avoir trouvée sensible au Vésuve, dans un amas formé depuis dix ans. La surface des laves est ordinairement scorifiée et criblée de petites ouvertures par lesquelles se sont échappés les gaz renfermés dans l'intérieur.

Outre les phénomènes précédents, il existe encore, dans certains volcans, des éruptions boueuses annonçant l'existence de vastes lacs souterrains et auxquelles sont dus les courants de même nature qui suivent diverses directions sur les flancs des montagnes, comme les laves incandescentes. L'existence de ces éruptions a été constatée par M. de Humboldt dans les volcans en activité du nouveau monde. La présence d'une quantité innombrable de petits poissons rejetés dans l'éruption d'un volcan du Mexique ne laisse aucun doute à cet égard; car si la lave eût été primitivement à l'état d'incandescence, il ne serait resté aucun vestige de la matière animale. Ces poissons étaient en si grand nombre, que leur putréfaction répandit dans l'air une odeur infecte qui produisit des maladies épidémiques. La lave qui renfermait les détritus de poissons s'est changée en une espèce de porphyre que les naturels du pays exploitent pour s'en servir comme de combustible.

Il existe une différence bien marquée entre les terrains volcaniques de l'ancien continent et ceux du nouveau : les premiers ont la forme d'un pain de sucre, et la matière est continuellement rejetée de manière à l'augmenter en hauteur; dans les terrains volcaniques du nouveau monde, il y a quelquefois soulèvement de terrain, et les éruptions se font par des cheminées dans l'axe du cône soulevé. En outre, les volcans de notre continent sont toujours situés dans des pays de montagnes, à peu de distance de la mer, tandis que ceux de l'Amérique se trouvent assez loin des côtes et sur des plateaux suffisamment élevés pour que les laves, s'échappant par les flancs, ne puissent s'épancher à leur surface.

Les éruptions d'un même volcan ont souvent lieu à des époques éloignées; on a remarqué qu'elles sont d'autant plus rares que les montagnes volcaniques sont plus élevées.

Les volcans qui s'éteignent se changent en soufrières, comme la solfatare de Pouzzole en est un exemple. Vers la fin des éruptions, il s'élève de la terre des miasmes infects qui nuisent à la santé des hommes et des animaux.

Les phénomènes volcaniques déterminent fréquemment des changements dans la forme du sol; des parties de la surface s'élèvent subitement. Souvent il se produit sur cette même surface des fentes et des crevasses par lesquelles les forces volcaniques manifestent leur activité. Des sources d'eaux acidulées paraissent quelquefois; d'autres sources, déjà existantes, éprouvent des changements remarquables.

Les pierres que lancent les volcans sont des masses de rochers, des ponces, des scories, des fragments de laves, des masses vitrifiées, des cristaux amoncelés, des brèches, etc. Ces masses sont projetées quelquefois à des hauteurs considérables. Le Cotopaxi a lancé en 1533 des rochers de 3 à 4 mètres de diamètre.

Le Vésuve lance parfois du granite, du micaschiste et d'autres substances qui, n'ayant pas été altérées par le feu, font connaître la nature des terrains que traversent les matières volcaniques. Les gaz qui se dégagent de ce volcan sont les acides sulfureux et chlorhydrique, quelquefois l'acide carbonique et rarement l'azote. Le sel marin, le sel ammoniac, les chlorures de cuivre, de fer, l'acide borique, le soufre, le sulfure d'arsenic, se subliment dans les fissures des roches et sur les parois du cratère.

Les volcans de l'Amérique ne dégagent pas les mêmes gaz que le Vésuve. M. Boussingault, qui a examiné la nature des fluides élastiques sortant des volcans situés entre le 5e degré de latitude nord et la ligne équinoxiale, a reconnu que le volcan du Tolima fournit de la vapeur d'eau, du gaz acide carbonique et du gaz

acide sulf-hydrique, ainsi que les volcans de Puracé, de Pasto et de Tuquères. Le volcan de Combal, situé très-près de la ligne équinoxiale, lui a donné en outre de la vapeur de soufre, et, comme produits accidentels, de l'acide sulfureux et de l'azote. On voit, d'après cela, que l'acide chlorhydrique, l'hydrogène et l'azote ne font pas partie des gaz qui se dégagent des volcans de l'équateur américain.

Les cratères ne sont pas disséminés au hasard sur la surface du globe, attendu que les gaz et les laves ont dû sortir par les points qui offraient le moins de résistance, et placés sur des lignes dont nous indiquerons dans un instant la direction. On compte 300 volcans environ, en plus ou moins grande activité à l'époque actuelle, et un bien plus grand nombre qui sont éteints. Voici, d'après M. Girardin, le relevé des volcans actifs et des solfatares, sans y comprendre, bien entendu, les volcans sous-marins.

Parties du monde.	Sur les continents.	Dans les îles.	Total.
Europe	4	20	24
Afrique	2	9	11
Asie	17	29	46
Amérique	86	28	114
Océanie	»	108	108
Total	109	194	303

Il y a donc environ deux fois plus de volcans dans les îles que dans les continents; en Amérique, dont la formation paraît plus récente que celle de l'ancien continent, le nombre est plus considérable que dans celui-ci.

M. de Buch établit deux classes de volcans : volcans centraux et chaînes volcaniques. Les premiers sont groupés autour de centres d'action; les seconds, peu éloignés les uns des autres, sont alignés dans une même direction.

En Europe et en Asie, il n'existe pas de volcans alignés, tandis qu'en Amérique ils font tous partie des

Cordillères. Au sud et au nord du Pérou, de la Nouvelle-Grenade et des provinces de Quito et de Porto, les volcans sont groupés par rangées et semblent continuer les chaînes de montagnes primitives. Les volcans éteints de l'intérieur de la France sont alignés comme les volcans des Cordillères.

Suivant M. de Buch, les volcans alignés proviennent de grandes failles pouvant appartenir à une chaîne de montagnes sous-marines, ou à une chaîne de montagnes terrestres : dans le premier cas, ils constituent des îles régulièrement disposées; dans le second, ils forment les sommets les plus élevés.

M. de Buch classe comme il suit les volcans :

1° BOUCHES VOLCANIQUES CENTRALES.

Volcans près de la mer.

L'Etna.— Ce volcan semble placé à l'extrémité d'une immense faille ou crevasse qui parcourt la Sicile du sud-ouest au nord-est.

Iles Lipari. — Elles paraissent dépendre de deux centres d'actions volcaniques, Volcano et Stromboli. Suivant M. Hofmann, il se produit dans l'intérieur du Stromboli une grande quantité de gaz qui s'accumulent jusqu'à ce qu'ils puissent vaincre la pression de l'air, à la suite duquel arrivent des blocs incandescents et des masses fluides de laves.

Vésuve.— Volcan central autour duquel se groupent ceux des champs phlégréens, quoiqu'ils n'aient aucun rapport entre eux.

Volcans de l'Islande. — L'Islande renferme un grand nombre de bouches volcaniques. Les éruptions de ces volcans sont remarquables par leur intensité et l'immense volume de lave qu'ils produisent. Dans l'intervalle des éruptions, il s'établit de nombreuses sources chaudes et des solfatares laissant échapper des matières inflammables.

Volcans des îles Açores.

VOLCANS des îles Canaries, célèbres par le pic de Ténériffe.

VOLCANS des îles Gallapagos.

VOLCANS des îles du Cap-Vert.

VOLCANS des îles Sandwich.

VOLCANS des îles Marquises et de la Société.

VOLCANS des îles des Amis.

VOLCANS de l'île Bourbon.

Volcans dans l'intérieur des continents.

Nous citerons en Chine le PÉ-CHAN ou MONTAGNE D'AMMONIAC, entre Koutche et Korgos, au centre de l'Asie, à 300 lieues géographiques (15 lieues au degré) de la mer Caspienne à l'ouest, à 275 de la mer Glaciale au nord, à 405 du grand Océan.

LE DJEBEL-KOLDAGHI, dans le Kordofan, à 112 lieues de la mer Rouge.

M. de Buch considère comme étant probablement volcaniques :

LE DEMAVEND, entre la mer Caspienne et la plaine de Perse; le MONT ARARAT; le SEIBAN-DAGH, à l'extrémité nord du lac Van, en Perse; enfin les montagnes de la Tartarie à l'ouest de la Chine et celles qui dégagent du sel ammoniac dans la Sibérie, à Chatauga, dans la partie septentrionale du cours du Jenizey.

2° CHAÎNES VOLCANIQUES.

ILES de la Grèce.

CHAÎNE située à l'ouest de l'Australie, comprenant la Nouvelle-Zélande, la Nouvelle-Calédonie, les Nouvelles-Hébrides, les îles Salomon et de la Louisiade, jusqu'à la Nouvelle-Guinée.

CHAÎNE des îles de la Sonde. — Parmi les points actifs les plus remarquables, nous citerons le WAWANI, dans l'île d'Amboine.

CHAÎNE des îles Moluques et des îles Philippines.

CHAÎNE des îles du Japon et des îles Kurilles.

CHAÎNE du Kamtschatka.

CHAÎNE des îles Aleutiennes.

CHAÎNE des îles Mariannes.

VOLCANS du Chili.

VOLCANS de Bolivia et du haut Pérou; cette série se compose d'environ 10 volcans.

VOLCANS de Quito, dont le Cotopaxi fait partie, ainsi que l'Antisana, le Pichincha et le Tunguragua, le Puracé, Pasto, le pic de Tolima.

VOLCANS des Antilles. — Nous citerons comme volcaniques : les îles de la Grenade, de Saint-Vincent, de Sainte-Lucie, de la Martinique, de la Dominique, de la Guadeloupe, etc.

VOLCANS de Guatimala.

VOLCANS du Mexique, au nombre de cinq en activité : Tuxtla au S.-E. de la Vera-Cruz; le pic d'Orizaba; Popocatepetl, ou volcan de la Puebla; Jorullo; Colima, le plus oriental de tous.

Si l'on compare les volcans des premiers âges du monde aux volcans actuels, suivant les effets produits, on ne tarde pas à reconnaître que les premiers avaient une puissance d'action que n'ont pas les seconds, en raison même de la différence dans l'épaisseur de la croûte du globe, qui est plus grande aujourd'hui que jadis. En étudiant tous les produits qui ont une origine ignée bien constatée, on distingue quatre époques volcaniques distinctes.

La première éruption de roches était granitique; elle a soulevé les terrains de sédiment jusqu'à la craie, comme on le voit sur la carte de M. Webster, qui se trouve annexée à la géologie et à la minéralogie de W. Buckland, t. II.

La deuxième éruption est celle des syénites, des porphyres, des serpentines, qui, à l'état de fusion, ont traversé les terrains primitifs stratifiés et les couches inférieures des terrains secondaires. Les serpentines ont été jusque dans les terrains tertiaires.

Les basaltes anciens et les trapps forment la troisième

éruption. Ces roches sont venues s'épancher à la surface du sol, et setrouvent dans les terrains de tous les âges. Cet épanchement s'est fait souvent par de larges ouvertures.

La quatrième éruption comprend les trachytes et les laves actuelles; l'action volcanique a produit des jets de ces matières à travers des ouvertures faites dans le granite, et qui sont venus former des cônes qu'on ne trouve pas dans les éruptions des premiers temps.

Il est à remarquer, comme nous l'avons déjà dit, que dans les premières éruptions, les matières rejetées étaient à l'état pâteux, tandis que celles qui sont venues ensuite se trouvaient plus liquides; mais au fur et à mesure que la liquéfaction a augmenté, les éruptions sont devenues moins fréquentes.

Théorie des phénomènes volcaniques.

Pour remonter aux causes des phénomènes volcaniques, il faut se rappeler tout ce qui a été dit précédemment concernant la formation de la terre.

Ces phénomènes ont été envisagés sous divers points de vue par les physiciens et les géologues : les uns n'admettent pas le feu central; les autres, au contraire, en font une condition indispensable.

Davy, aussitôt après sa découverte du potassium, du sodium, etc., avança que ces métaux existaient dans la terre à de grandes profondeurs, et que leur contact avec les eaux infiltrées produisait tous les effets volcaniques connus. Ces réactions avaient lieu, suivant lui, dans d'immenses cavités souterraines, où l'eau pénétrait jusqu'aux substances actives, longtemps avant que celles-ci atteignissent la surface extérieure.

Le tonnerre souterrain entendu à de si grandes distances sous le Vésuve, était presque une démonstration de grandes cavités souterraines et du déplacement des substances aériformes qu'elles renfermaient. Quand le volcan était tranquille, ces cavités se remplissaient d'air atmosphérique et d'eau, et les réactions chimiques commençaient aussitôt; l'eau était alors décomposée,

il y avait oxydation du potassium, du sodium, du silicium, etc., dégagement de gaz hydrogène et d'une quantité énorme de chaleur.

En admettant cette supposition, les laves seraient formées par les actions combinées de l'eau de mer et de l'air sur les métaux. Le voisinage des grands volcans des côtes de la mer viendrait à l'appui de cette explication, ainsi que la présence de l'acide chlorhydrique et du sel marin dans les produits volcaniques de nos contrées. Dans les volcans de l'Amérique du Sud, l'eau étant fournie par des lacs souterrains, l'acide chlorhydrique et le sel marin ne seraient plus au nombre des déjections.

M. Gay-Lussac a fait plusieurs objections à cette ingénieuse théorie : comment l'air pourrait-il pénétrer dans les foyers volcaniques, quand il y existe du dedans au dehors une pression de 300 atmosphères environ, capable d'élever la lave, trois fois plus pesante que l'eau, à une hauteur de 1000 mètres? Si l'air pouvait s'y introduire, les tremblements de terre résultant de la précipitation des masses gazeuses dans les grandes cavités deviendraient impossibles. D'un autre côté, si les actions volcaniques étaient le résultat de la décomposition de l'eau par les métaux des alcalis et des terres, il devrait y avoir un dégagement énorme de gaz hydrogène; or, on n'aperçoit jamais aucune inflammation de ce gaz au-dessus du cratère. Il pourrait se faire, à la vérité, que ce gaz, en se combinant avec le chlore, produisît de l'acide chlorhydrique; mais dans ce cas la quantité de cet acide devrait être plus considérable qu'elle n'est réellement.

M. Gay-Lussac attribue les phénomènes volcaniques à l'action des eaux de la mer sur les chlorures des métaux des terres et des alcalis, laquelle dégage probablement assez de chaleur pour vaporiser l'eau, décomposer le sel marin, liquéfier les roches et produire tous les autres effets volcaniques. Pour expliquer la formation de l'acide sulfureux, il admet au milieu des chlo-

rures la présence de sulfures, qui sont également décomposés à une température élevée. Le soufre s'élevant en vapeur avec les autres matières rejetées, se change en acide sulfureux aussitôt qu'il a le contact de l'air. M. Gay-Lussac regarde comme probable que l'eau de la mer pénètre dans les foyers volcaniques par les fissures des roches; mais alors pourquoi la lave ne sortirait-elle pas aussi par les mêmes fissures, les mêmes canaux conducteurs, puisqu'elle y trouverait une résistance moins grande que partout ailleurs? M. Gay-Lussac répond à cette objection en disant que les longues intermittences des volcans font présumer que l'eau ne pénètre que peu à peu par sa propre pression à travers des fissures et s'accumule alors insensiblement dans les vastes cavités de la terre; après quoi les feux volcaniques se rallument peu à peu, et la lave, après avoir obstrué les canaux par lesquels l'eau était arrivée, s'élève par son soupirail habituel.

Davy et M. Gay-Lussac ne font jouer aucun rôle à la chaleur centrale; cependant il n'est plus possible de douter qu'elle n'intervienne dans la production des phénomènes volcaniques. Davy, en admettant le concours de l'eau, de l'air et des métaux des terres et des alcalis, n'atteint pas le but qu'il s'était proposé, comme M. Gay-Lussac l'a démontré; d'un autre côté, M. Gay-Lussac lui-même, en substituant les chlorures anhydres aux métaux de Davy, sans faire intervenir le feu central, n'a point avancé davantage la question. Ampère a donné une autre explication des phénomènes: il a pris pour point de départ le feu central, et a admis en outre l'existence des métaux alcalins et terreux, et des chlorures anhydres. Il n'adopte pas, toutefois, la liquéfaction des matières placées au-dessous de la croûte solide, attendu qu'elle produirait, suivant lui, sous l'influence lunaire, des marées analogues à celles de nos mers, et qui seraient terribles en raison de l'étendue et de la densité du liquide. D'après la manière de voir d'Ampère, un volcan ne serait donc, en réalité, qu'une fissure permanente

servant à établir une communication directe entre la couche non oxydée, possédant une température très-élevée, et les liquides qui se trouvent à la surface du globe; aussitôt que le contact a lieu, il se produit de violentes réactions chimiques, d'où résultent des exhaussements de terrain, des déjections et tous les effets propres aux phénomènes volcaniques.

M. Cordier fait jouer à la chaleur centrale, dans la production des phénomènes volcaniques, un rôle plus direct; il les considère comme une conséquence du refroidissement du globe, et les rattache aux tremblements de terre, dont il sera question dans le paragraphe suivant. M. Cordier pense que la surface inférieure de la croûte solide étant couverte d'inégalités, de même que la surface extérieure, il y a entre la première et la masse centrale de vastes cavités remplies de gaz divers provenant du refroidissement, dont les solfatares et les émissions gazeuses démontrent l'existence. Il résulterait de là que le déplacement plus ou moins rapide de ces gaz produirait des oscillations, et par suite des tremblements de terre; que les craquements seraient le résultat du froissement les uns sur les autres des terrains déplacés; et enfin que les gaz, en sortant par les ouvertures ou les fissures des roches, pourraient projeter au dehors des matières solides et liquides. Pour expliquer cette projection de gaz et de matières, M. Cordier admet que le globe étant dans un état continuel de refroidissement, son volume devient plus petit, et d'autant plus que le mouvement de rotation augmentant par suite du refroidissement, les pôles tendent à se rapprocher; les matières intérieures sont alors plus pressées, et tendent à sortir par toutes les issues qui se présentent à elles, puis à s'épancher à la surface. Les soulèvements des chaînes de montagnes seraient donc la conséquence immédiate des éruptions diverses qui auraient eu lieu à des époques différentes, en fracturant la croûte.

Une diminution excessivement petite dans le diamètre pourrait produire, en effet, un épanchement de matières

assez considérable. Une diminution de $\frac{1}{500}$ de millimètre, par exemple, dans le rayon terrestre, donnerait lieu à une masse solide de 1 kilomètre cube, qui est à peu près la masse moyenne émise dans chaque éruption. La diminution de 1 millimètre dans le rayon terrestre fournirait donc de quoi alimenter les éruptions volcaniques pendant plusieurs siècles.

Pour montrer la possibilité de cette hypothèse, nous examinerons l'effet produit en supposant que la terre se contractât en moyenne de la même quantité que le verre. Cette substance se dilate en longueur d'environ 0,000008 par chaque degré de température. Or, en admettant ce nombre pour la terre, le rayon terrestre, qui est en moyenne de 6366410 mètres, diminuerait, pour un degré de refroidissement, de $50^{m},930$; mais comme la diminution de la température à la surface de la terre n'est pas de $\frac{1}{57600}$ de degré en 100 ans, il en résulterait au maximum, dans le même temps, une diminution de $0^{mm},9$ dans le rayon, et par an, à peu près $\frac{1}{100}$ de millimètre; en prenant le $\frac{1}{5}$ de ce nombre, la diminution de volume qui en résulterait serait encore de 1 kilomètre cube par an, quantité capable d'alimenter pendant ce temps les éruptions volcaniques.

M. Élie de Beaumont ne pense pas que la croûte extérieure, en se contractant par l'effet du refroidissement, comprime la masse intérieure encore liquide ou à l'état pâteux; suivant lui, l'on doit attribuer les soulèvements, les tremblements de terre ainsi que les phénomènes volcaniques au plissement de l'écorce, conséquence immédiate du retrait et du mouvement de fluctuation de la masse liquide. Les éruptions ne seraient pas la cause, mais le résultat des grandes dislocations; ainsi, la matière en fusion n'aurait pas déterminé les fractures des couches, mais elle aurait glissé dans les interstices de ces fractures. Les volcans n'auraient donc pas contribué aux différents soulèvements, ils en seraient seulement la conséquence; étant tous placés sur la ligne de faîte d'une chaîne volcanique, ou au pied de cette même chaîne, cette circons-

tance semble indiquer que les effets ont été produits dans les parties où la résistance était la moindre, précisément sur la ligne terminale des plissements ou des soulèvements.

Il pourrait bien se faire qu'indépendamment du refroidissement de la terre et des dégagements de gaz qui peuvent en résulter, les réactions signalées par Davy, Ampère et M. Gay-Lussac, intervinssent dans la production des phénomènes volcaniques ; néanmoins rien ne le prouve.

§ III. *Des tremblements de terre.*

La croûte du globe éprouve quelquefois, dans certaines localités, des secousses plus ou moins violentes, qui bouleversent un pays, renversent les cités, et se font sentir à de grandes distances. Les îles sont plus exposées à ces mouvements oscillatoires que les continents, les rivages plus que l'intérieur, et les régions équatoriales plus que les régions polaires.

Ce phénomène est circonscrit souvent autour des centres volcaniques, il se manifeste le plus habituellement dans les régions volcaniques et dans celles où il existe des volcans éteints, et on prétend qu'il est en rapport avec les saisons et les grandes pluies ; mais on ne sait encore rien de bien certain à cet égard. M. Schouw a même avancé, comme l'ayant observé, que ce phénomène est plus fréquent en hiver et après les pluies qui suivent une grande sécheresse qu'à toute autre époque. On a un exemple du contraire dans le tremblement de terre qui vient de bouleverser récemment une partie de la Toscane, lequel a eu lieu à la suite d'une très-grande sécheresse.

La durée de la secousse est très-variable : quelquefois elle est inappréciable ; d'autres fois elle est de plusieurs secondes ; dans le dernier tremblement de terre de Toscane, elle a été de 25 secondes. Souvent elle se répète plusieurs fois chaque jour, pendant plusieurs années. A la Jamaïque, on en éprouve tous les ans.

Quand une grande contrée est ébranlée, il arrive quelquefois que des points intermédiaires ne le sont pas. Lors du tremblement de terre de Lisbonne, en 1755, les bâtiments de la plaine s'écroulèrent, tandis que ceux qui étaient situés sur la pente escarpée des montagnes furent épargnés. Fréquemment après un tremblement de terre, il y a une éruption volcanique.

Le phénomène se manifeste soit par des mouvements ondulatoires dans le sens horizontal, soit par des mouvements dans le sens vertical plus ou moins violents; et ce sont les plus dangereux, soit enfin par une simple trépidation, comme si la terre était fortement frappée en un point. Ces différents mouvements se transmettent souvent à plusieurs centaines de lieues du foyer principal, ou du moins du point le plus fortement ébranlé. Le tremblement de terre de Lisbonne, par exemple, s'est fait sentir instantanément sur les côtes occidentales de l'Europe, en Danemark, et sur les côtes de l'Afrique.

Les tremblements de terre sont fréquemment accompagnés de dégagements de gaz tellement considérables, que la mer bouillonne et que d'énormes masses gazeuses s'échappent dans l'atmosphère. On cite un tremblement de terre dans les Pyrénées, à la suite duquel le cirque de Gavarni fut enveloppé d'une colonne d'air chaud fortement chargée de vapeurs sulfureuses. On a remarqué encore qu'il se dégage des gaz du fond du lac de Genève, quand on éprouve des tremblements de terre dans les Alpes. Les matières gazeuses sont souvent accompagnées d'une odeur sulfureuse qui affecte les animaux et les hommes, mais plus sensiblement les premiers que les seconds. On prétend même que les plantes qui en sont imprégnées causent des épizooties.

On rapporte au mouvement des masses gazeuses dans les vastes cavités terrestres le roulement de tonnerre souterrain qui accompagne les tremblements de terre et les éruptions volcaniques avec lesquelles ils sont liés. Ce roulement ne se manifeste pas aux mêmes phases du phénomène : à Cumana, il précède les secousses; à Quito, à

Caraccas et aux Antilles, il ne se fait entendre que longtemps après. Il dure quelquefois plusieurs mois sans que le sol soit ébranlé. D'un autre côté, on cite des tremblements de terre, comme celui de Lisbonne, qui n'ont été accompagnés d'aucun bruit.

Les nombreuses observations recueillies jusqu'ici sur les tremblements de terre prouvent que les causes qui les produisent sont les mêmes que celles qui donnent naissance aux phénomènes volcaniques et aux eaux thermales, et sont relatives par conséquent à la chaleur d'origine de la terre.

Envisagés sous ce point de vue, les tremblements de terre peuvent être rapportés à trois causes : 1° au refroidissement inégal de la croûte et de l'intérieur de la terre; 2° à l'action de l'eau et de l'air sur la masse en incandescence de la partie non oxydée de la terre; 3° à l'action des gaz qui tendent à se frayer une issue. Voici comment elles agissent.

La terre, en se refroidissant inégalement, éprouve nécessairement des plissements, des craquements accompagnés de fissures de peu de largeur, mais d'une grande étendue. Ces fissures se dirigent à peu près suivant les méridiens ; cette direction est précisément celle qu'affectent généralement les tremblements de terre. Pour expliquer l'apparition des matières gazeuses, le bruit de tonnerre souterrain et le roulement, il suffit d'invoquer la seconde et la troisième causes signalées.

Dans la réaction de l'eau et de l'air, sur la masse en incandescence non oxydée, il s'opère un dégagement énorme de gaz et de vapeurs qui, en se dilatant et se condensant successivement dans les vastes cavités de la terre dont on ne saurait nier l'existence, y produisent des détonations analogues aux coups de tonnerre, et par suite des oscillations dans l'écorce du globe, qui doivent se propager à de grandes distances.

Les tremblements de terre ne peuvent être séparés, comme on le voit, des phénomènes volcaniques, et doivent être considérés, ainsi que ces derniers, comme des

conséquences de la chaleur d'origine de la terre. Nous nous bornerons, en terminant, à faire les deux remarques suivantes :

1° Les attractions solaire et lunaire doivent faire sentir leur influence sur la masse liquide située au-dessous de la croûte solide, comme sur la mer, et il doit en résulter des actions dont on ne peut calculer la puissance, ne connaissant ni la viscosité, ni l'état dans lequel se trouvent les corps qui composent la masse centrale ; mais ces actions doivent être à leur maximum vers l'équateur. Peut-être est-ce là la cause de la fréquence des éruptions volcaniques et des tremblements de terre dans les régions tropicales, et de leur diminution à mesure que l'on approche des pôles.

2° Dans le cas où l'on admettrait que le refroidissement de la terre est la cause des grands phénomènes terrestres dont nous venons de parler, on pourrait se demander comment il se fait qu'un refroidissement continuel puisse donner lieu à des effets intermittents et qui se succèdent à des intervalles plus ou moins longs. La réponse est facile : la croûte terrestre, composée d'éléments hétérogènes, se trouverait dans le même cas que les substances dont on étudie l'élasticité, et qui présentent des allongements par soubresauts, alors que l'on fait varier régulièrement la force qui agit sur elles ; ainsi les états d'équilibre de la terre pendant le refroidissement graduel ne passeraient de l'un à l'autre que par des soubresauts brusques donnant lieu à des plissements latéraux de la surface et à des craquements.

Peut-être faut-il encore rapporter à la déperdition de la chaleur centrale, les inégalités dans l'élévation des continents, qui ne seraient, par rapport aux phénomènes précédents, que des variations séculaires très-lentes dans l'état de la surface du globe. Ce sujet étant du ressort de la géologie et de la géographie physique, ne comporte pas ici de plus grands développements, et nous entraînerait trop loin.

§ IV. *Du remplissage des filons.*

Les filons sont des fentes produites par le refroidissement dans l'écorce solide du globe, et remplies postérieurement. Les géologues varient d'opinion sur leur mode de remplissage. Les uns leur attribuent une origine aqueuse, les autres une origine ignée. Werner admet que la masse de chaque filon est le résultat de précipités qui ont rempli les fentes, en totalité ou en partie, par en haut, à l'aide d'une dissolution aqueuse qui couvrait la contrée.

S'il existe des filons qui paraissent avoir eu cette origine, il en est d'autres pour lesquels cette supposition est inadmissible; tout tend à prouver que, dans la plupart des cas, le remplissage a eu lieu par sublimation.

Hutton, partisan de l'origine ignée, pensait que la chaleur intérieure de la terre était assez considérable pour fondre et réduire en vapeurs les métaux et les terres, lesquelles vapeurs se sont fait jour à travers les fissures, et ont donné naissance, en se liquéfiant et se solidifiant, aux matières qui remplissent les filons et aux différentes roches cristallisées. Il explique ainsi la formation des grands filons de basalte qui traversent les terrains de toutes les époques. Suivant cette manière de voir, les filons auraient été remplis de bas en haut par sublimation, et de haut en bas par des matières détruites ou enlevées de la surface du globe par des causes quelconques. Ce mode de remplissage s'appliquerait à plusieurs filons pierreux ou métalliques qui, en raison de leur composition, n'ont pu être remplis entièrement par en bas.

Les géologues pensent néanmoins que l'on ne peut admettre l'origine ignée à l'exclusion de l'origine aqueuse, attendu que, suivant les circonstances, le feu et l'eau ont concouru successivement au remplissage de quelques filons. Ils regardent comme certain, par exemple, que les filons qui renferment des débris de roche, pro-

venant des assises supérieures des terrains qu'ils traversent ainsi que des corps organisés, ont été remplis par leur ouverture supérieure; mais il n'en est pas de même à l'égard des filons dont les salbandes et les épontes sont intimement liées ensemble. Dans ce cas, on est obligé de supposer que la formation de la roche, celle du filon et son remplissage ont été presque contemporains. D'un autre côté, quand on voit des amas cristallisés de diverses substances au milieu de roches également cristallisées, enveloppés de toutes parts par elles, de manière à ce qu'on ne puisse dire qu'ils aient été introduits dans les cavités qu'ils remplissent, ni par en haut, ni par en bas, on est porté à considérer ce filon comme une fente ouverte au milieu d'un magma cristallin, pénétré encore de la dissolution en état de précipitation, et déposant dans cet espace, moins saturé ou moins épais, des parties d'une structure et d'une nature un peu différentes de celles du reste de la roche.

Lorsque les épontes des filons sont tapissées de matières siliceuses, calcaires ou métalliques, disposées par lits onduleux et parallèles entre eux et aux salbandes, on ne peut admettre que le remplissage se soit opéré au moyen d'une dissolution arrivant par en haut, et déposant des couches épaisses d'une matière aussi peu attaquable par les agents que nous connaissons, à moins de supposer que le filon ne se soit ouvert graduellement.

Il y a encore un autre mode de remplissage dont on n'a pu donner une explication satisfaisante : c'est celui qui a constitué les filons renfermant des sulfures, des arséniures métalliques, déposés en houppes cristallines sur toutes les parties du filon en saillie, corps décomposables dans toute dissolution aqueuse, et qui ne peuvent supporter une température élevée sans voir leurs parties constituantes séparées; il faudrait, pour s'en rendre compte, admettre l'action d'une pression considérable.

Il résulte de cet exposé que les filons n'ont pas été produits par une cause unique et générale, et que, si

la chaleur centrale a concouru à leur formation, d'autres causes sont encore intervenues.

SECTION IV.

TEMPÉRATURE DE LA SURFACE DU GLOBE.

---

§ I. *De la température de la terre au-dessus de la couche invariable jusqu'au sol.*

Après avoir exposé tout ce qui concerne la chaleur d'origine de la terre, ainsi que les phénomènes qui paraissent en dépendre, nous avons à nous occuper de la température de la croûte terrestre depuis la couche invariable jusqu'au sol, température qui provient de l'inégale répartition de la chaleur solaire sur le globe, et qui varie par conséquent avec les saisons.

La couche invariable, qui nous sert de point de départ, est située à une profondeur d'autant plus grande au-dessous du sol, que l'on s'éloigne davantage de l'équateur, attendu que cette profondeur dépend de l'amplitude des variations de température dans le cours de l'année, et du pouvoir conducteur des matières composant la croûte. Entre les tropiques, comme l'a constaté M. Boussingault (*Annales de physique et de chimie*, t. LIII, p. 228), elle se trouve à environ $0^{m},33$. La température moyenne de cette couche, suivant M. de Humboldt, est de $27^{\circ},50$, et, d'après M. Boussingault, de 26° à $28^{\circ},5$.

Dans les latitudes moyennes, comme on va le voir, la profondeur de la couche invariable va jusqu'à 24 mètres.

On évalue la température au-dessous du sol au moyen de thermomètres à tubes plus ou moins longs, enfoncés dans la terre à diverses profondeurs. Sans entrer dans le détail des observations faites à ce sujet, nous rapporterons les conséquences auxquelles ont conduit les recherches exécutées dans nos climats, c'est-à-dire, sous des latitudes moyennes.

1° Au delà de 1^m,2 de profondeur, les variations diurnes cessent d'être sensibles.

2° Les températures moyennes annuelles des différentes couches présentent peu de différence avec la température moyenne annuelle de l'air.

3° Les différences entre le maximum et le minimum de chaque couche décroissent en progression géométrique pour des profondeurs croissant en progression arithmétique.

4° A la profondeur de 8 ou 9 mètres, la variation annuelle n'est plus que de 1°; à 15 ou 16 mètres, elle est de 0°,1; au delà elle n'est plus sensible.

Suivant M. Quetelet, auquel est dû ce résumé, il paraît qu'à Paris, Strasbourg, Zurich et Bruxelles, les variations sont nulles à 24 mètres.

5° A 8 mètres au-dessous du sol, c'est-à-dire, vers les points où la variation est de 1°, les changements de température sont inverses de ceux qui ont lieu à la surface; ainsi le maximum se manifeste vers le 1er janvier, et le minimum vers la fin de juin. Cette inversion doit être attribuée à la difficulté avec laquelle s'opère la transmission de la chaleur solaire dans la terre; au mois de janvier, la chaleur qu'elle a acquise dans le mois de juin ne fait que de parvenir dans les parties inférieures, tandis qu'au mois de juin ces couches se ressentent des froids de l'hiver.

Ces effets, bien entendu, varient, quant à l'intensité, avec la nature des terrains. Les observations suivantes, faites par M. Forbes, près d'Édimbourg (1), montrent comment la nature du sol influe sur l'amplitude maximum de la variation annuelle. Les nombres inscrits dans le tableau indiquent l'amplitude des changements annuels de température.

(1) *Comptes rendus*, tome VIII, page 86.

ROCHES.	PROFONDEUR EN MÈTRES.				ÉPOQUES DES MAXIMA DE TEMPÉRATURE.			
	1 MÈT.	2 MÈT.	4 MÈT.	8 MÈT.	1 MÈT.	2 MÈT.	4 MÈT.	8 MÈT.
Trapp...	10°,53	6°,61	3°,05	0°,80	6 août.	2 sept.	17 oct.	8 janv.
Sable ...	11°,23	8°,30	4°,19	1°,16	31 juill.	24 août	7 oct.	30 déc.
Grès. ...	9°,58	7°,72	5°,22	2°,28	5 août.	19 août	11 sept.	11 nov.

On voit que, dans le grès, les variations de température à 1 mètre de profondeur sont moins élevées que dans le trapp, et dans le trapp moindres que dans le sable; qu'à 2 mètres le rapport est déjà changé, puisque la différence de température est plus élevée dans le grès que dans le trapp; enfin à 8 mètres, elle est plus forte dans le grès que dans les autres terrains.

M. Forbes a déduit aussi de ses observations le fait déjà constaté, que la température moyenne au-dessous du sol croît avec la profondeur, puisque, dans la couche de sable, il a trouvé simultanément, à 1 mètre, 8°,069; à 2 mètres, 8°,159; à 4 mètres, 8°,289; à 8 mètres, 8°,480.

Dans la section précédente, en exposant les eaux thermales, nous avons fait mention seulement des eaux minérales dont la température variait avec celle du sol, laquelle était indépendante jusqu'à un certain point de la chaleur d'origine, et se trouvait nécessairement en rapport avec celle des terrains d'où elles viennent. Les différentes sources au-dessous du sol ayant sensiblement la même température moyenne que celle de

la surface, on a proposé de faire servir l'une à la détermination de l'autre. Mais comme il existe entre elles des différences dues à des causes locales, ce moyen ne peut être employé qu'avec une certaine réserve. En effet, un grand nombre d'observations ont prouvé que dans la partie occidentale de l'Europe, la température des sources et la température moyenne à la surface sont égales. Dans les régions septentrionales, comme la Norwége occidentale en est un exemple, la température des sources paraît inférieure à la moyenne du lieu. Quand on s'éloigne de la mer, en Europe, on trouve qu'au nord des Alpes les sources sont plus chaudes que la moyenne, et que la différence augmente à mesure que l'on s'avance dans les terres. En Italie et sous les tropiques, les sources sont plus froides que la moyenne de l'air.

Si l'on cherche à se rendre compte des causes qui produisent des effets si divers, on trouve en première ligne la quantité d'eau tombée dans chaque contrée. L'eau, en s'infiltrant dans la terre, y porte nécessairement sa température, qui participe plus ou moins de celle de l'air qu'elle a traversé avant d'arriver au sol. Les faits suivants ne laissent aucun doute à cet égard: en Angleterre, où la quantité d'eau tombée dans chaque saison est la même, la différence entre les deux températures doit être nulle. En Allemagne et en Suède, où il tombe plus d'eau en été qu'en hiver, les sources ont une température plus élevée de quelques degrés que la moyenne de l'air; tandis qu'en Norwége et en Italie, on doit observer des effets opposés. Enfin, dans les régions tropicales, lors de la saison des pluies, la température de l'air étant abaissée, les eaux doivent communiquer aux sources une température inférieure à la moyenne de l'air.

§ II. *De la température de l'air à la surface du sol.*

Cette température exerce une si grande influence sur les phénomènes de la vie organique et sur les travaux agricoles, qu'on a dû se livrer à des observations suivies

afin de saisir les lois qui lient les phénomènes calorifiques de l'atmosphère à la surface du sol.

Ces phénomènes sont extrêmement complexes, la température étant rarement stationnaire, puisque mille causes, dont nous indiquerons plus loin les principales, tendent sans cesse à l'élever ou à l'abaisser, et compliquent ainsi son étude. Il est bien rare que deux jours de suite, à la même heure, abstraction faite de la hauteur du soleil, la température soit la même dans le même lieu; cependant il est possible, au milieu des variations qui affectent la véritable température locale, de trouver ce qu'il y a de fixe dans ce phénomène variable; il suffit pour cela de prendre la moyenne d'un grand nombre d'observations. Cette marche est celle qui est toujours adoptée dans les recherches statistiques.

On observe la température avec un thermomètre muni d'une échelle en verre et exposé directement au nord, afin de le laisser le moins de temps possible au soleil, et encore le retourne-t-on pour le remettre à l'ombre quand les rayons commencent à le frapper; on le garantit de la pluie au moyen d'un petit toit de métal. On évite les effets du rayonnement en enlevant le thermomètre et en lui imprimant pendant quelques instants un mouvement de rotation dans l'air, afin de le mettre en équilibre de température avec les couches d'air ambiant.

On commence par déterminer la température moyenne de chaque heure de la journée; ensuite l'on prend la moyenne des températures de cette même heure pendant chaque mois, puis pendant toute l'année; on a ainsi les moyennes horaires mensuelles, et horaires annuelles. Cette évaluation obtenue, l'élément le plus important est la température moyenne du jour. Quand on a fait des séries d'observations horaires, la moyenne des différentes heures de la journée donne la moyenne diurne; si l'on n'a pas observé continuellement le thermomètre, la température moyenne du jour peut être obtenue à l'aide des méthodes suivantes :

1° En prenant la moyenne de trois observations faites l'une au soleil levant, l'autre à 2 heures après-midi, la troisième au coucher du soleil;

2° En prenant la moyenne des températures maximum et minimum de la journée;

3° En prenant la moyenne des températures de deux heures homonymes avant ou après midi et minuit;

4° En calculant, d'après M. Kaemtz, cette température à l'aide des températures maximum et minimum du jour, comme il suit : on ajoute au minimum le produit de la différence entre le maximum et le minimum par un coefficient qu'on détermine par expérience et qui est variable d'un mois à un autre. (*Kaemtz*, Éléments de météorologie, p. 21 et 22.) Ce météorologiste considère les résultats obtenus par cette méthode comme étant les plus exacts, les trois autres procédés donnant une moyenne qui diffère un peu de la moyenne réelle, déduite des séries d'observations horaires.

La moyenne diurne étant connue, on évalue ensuite, 1° la température mensuelle, qui est la moyenne des températures moyennes de chaque jour; 2° les températures estivale et hivernale, qui sont les moyennes des trois mois d'été et des trois mois d'hiver (l'hiver météorologique comprenant décembre, janvier et février; l'été, juin, juillet et août); 3° la température moyenne de l'année, qui se compose de la moyenne des températures des douze mois; 4° enfin la température du lieu, qui est la moyenne de toutes les moyennes annuelles prises pendant le plus grand nombre d'années possible.

Toutes ces déterminations sont indispensables pour les régions tempérées, où les changements de température sont très-irréguliers.

En météorologie, il ne suffit pas de déterminer pour chaque localité tous ces éléments, il est indispensable encore de comparer les éléments d'une localité avec ceux d'une autre localité, et cela de proche en proche, afin d'arriver à la connaissance de la distribution de la chaleur sur toute la surface du globe. On se rend compte

de cette distribution au moyen de cartes géographiques sur lesquelles on rapporte les déterminations de température moyenne de même ordre; on réunit ensuite par des courbes les points possédant la même température moyenne. On appelle lignes isochimènes (d'égal hiver) et isothères (d'égal été) les courbes qui comprennent la même température hivernale et estivale; lignes isothermes, les courbes représentant les températures moyennes annuelles égales.

Variations horaires. — Chaque jour il y a un maximum et un minimum de température : le minimum a lieu avant le lever du soleil, et le maximum vers 2 heures de l'après-midi, un peu plus tôt en hiver qu'en été. Pour se rendre compte des variations horaires, il faut suivre la marche du rayonnement de la chaleur depuis le lever du soleil jusqu'à l'instant où il disparaît au-dessous de l'horizon.

Lorsque le soleil se lève, il commence à échauffer la terre, ainsi que l'atmosphère, et d'autant plus qu'il s'approche davantage du zénith; avant midi, et quelque temps après, elle reçoit plus de chaleur qu'elle n'en perd par le rayonnement, de sorte que le maximum doit avoir lieu plusieurs heures après le passage du soleil au méridien. A mesure que cet astre s'approche de l'horizon, il se produit un effet contraire, c'est-à-dire que la terre perd plus qu'elle ne reçoit; la température doit donc baisser d'autant plus rapidement que le soleil est sur le point de disparaître.

Le maximum de température dans les pays chauds et sur les bords de la mer a souvent lieu avant midi, parce qu'il s'élève à cette heure des brises de mer qui abaissent la température. M. Kaemtz a vu que sur les bords de la mer Baltique le maximum a lieu dans l'après-midi, mais plusieurs heures plus tôt qu'à Halle, situé dans l'intérieur du continent. On a observé en outre que le climat du sommet des montagnes, sous le rapport de la variation diurne, a la plus grande analogie avec les climats marins; ainsi la température de midi est en gé-

néral plus élevée que celle de deux ou de trois heures.

Depuis que l'on s'occupe de météorologie d'une manière suivie, on a formé dans beaucoup de localités des tableaux de variations horaires. Il suffit d'un de ces tableaux pour mettre en évidence les résultats généraux que nous venons d'énoncer; nous nous bornons donc à rapporter les nombres consignés dans le tableau de la page suivante.

On verra que le minimum et le maximum, comme nous l'avons annoncé, ont lieu quelque temps avant le soleil levé et quelques heures après midi; le maximum vers 2 heures du soir en hiver et vers 3 heures en été; le minimum entre 6 et 7 heures en hiver, et en été vers 3 heures du matin.

Pour avoir l'instant précis des maxima et minima, il faudrait construire les courbes des températures moyennes horaires, ayant pour abscisses les heures et pour ordonnées les températures; quant à l'amplitude de la variation diurne, elle dépend de la saison et des causes locales dont il sera question plus loin.

On reconnaît à l'inspection du tableau que la marche de la température, dans les différents mois, suit la position du soleil par rapport à notre hémisphère. En janvier, la hauteur angulaire de cet astre devenant plus considérable et les jours augmentant, le soleil agit plus fortement et la terre s'échauffe davantage; cet effet se continue de jour en jour, et c'est vers l'équinoxe du printemps que la température s'élève avec le plus de rapidité; alors la terre s'échauffe plus le jour qu'elle ne se refroidit la nuit par rayonnement. Le maximum de température n'a pas lieu au solstice d'été, mais après cette époque, au moment où la chaleur reçue le jour compense la perte nocturne; c'est seulement lorsque les jours diminuent rapidement que la température s'abaisse.

MOYENNES DES OBSERVATIONS THERMOMÉTRIQUES FAITES A HALLE PAR M. KAEMTZ,

Pendant plusieurs années, de 6 heures du matin à 10 heures du soir, d'heure en heure, ou de deux heures en deux heures.

HEURES.	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.
Midi. 0	— 1°,02	1°,90	6°,04	13°,25	16°,26	19°,01	21°,51	21°,11	17°,86	12°,45	5°,69	3°,46
1	— 0 ,69	2 ,51	6 ,45	13 ,88	16 ,85	19 ,56	22 ,15	21 ,68	18 ,35	12 ,98	6 ,08	3 ,69
2	— 0 ,59	2 ,82	6 ,66	14 ,18	17 ,09	19 ,91	22 ,53	21 ,90	18 ,59	13 ,16	6 ,16	3 ,70
3	— 0 ,72	2 ,63	6 ,51	14 ,10	17 ,14	20 ,05	22 ,63	21 ,95	18 ,55	12 ,85	5 ,90	3 ,51
4	— 0 ,98	2 ,16	6 ,21	13 ,66	16 ,84	19 ,76	22 ,31	21 ,61	18 ,19	12 ,30	5 ,43	3 ,26
5	— 1 ,39	1 ,56	5 ,65	13 ,02	16 ,35	19 ,15	21 ,65	21 ,04	17 ,58	11 ,66	4 ,94	2 ,86
6	— 1 ,67	1 ,04	5 ,02	12 ,26	15 ,73	18 ,50	20 ,90	19 ,95	16 ,75	10 ,90	4 ,50	2 ,59
7	— 1 ,89	0 ,66	4 ,53	11 ,23	14 ,90	17 ,59	19 ,94	19 ,22	15 ,86	10 ,26	4 ,17	2 ,38
8	— 2 ,05	0 ,41	3 ,95	10 ,46	14 ,00	16 ,63	18 ,89	18 ,23	14 ,94	9 ,66	3 ,95	2 ,23
9	— 2 ,19	0 ,14	3 ,55	9 ,63	13 ,05	15 ,63	17 ,88	17 ,30	14 ,10	9 ,09	3 ,74	2 ,07
10	— 2 ,31	— 0 ,08	3 ,14	8 ,93	12 ,08	14 ,59	16 ,84	16 ,37	13 ,37	8 ,55	3 ,51	1 ,91
11	— 2 ,44	— 0 ,28	2 ,89	8 ,37	10 ,88	13 ,46	15 ,86	15 ,48	12 ,68	8 ,00	3 ,26	1 ,88
Min. 12	— 2 ,56	— 0 ,51	2 ,65	7 ,81	9 ,67	12 ,36	14 ,90	14 ,61	12 ,09	7 ,56	3 ,05	1 ,84
13	— 2 ,65	— 0 ,74	2 ,43	7 ,32	8 ,64	11 ,44	14 ,09	13 ,92	11 ,55	7 ,19	2 ,89	1 ,80
14	— 2 ,71	— 0 ,95	2 ,18	6 ,88	7 ,96	10 ,83	13 ,55	13 ,34	11 ,09	6 ,89	2 ,81	1 ,76
15	— 2 ,75	— 1 ,12	1 ,91	6 ,45	7 ,81	10 ,79	13 ,42	13 ,03	10 ,72	6 ,62	2 ,79	1 ,74
16	— 2 ,80	— 1 ,27	1 ,70	6 ,28	8 ,21	11 ,20	13 ,75	13 ,04	10 ,56	6 ,44	2 ,74	1 ,71
17	— 2 ,87	— 1 ,37	1 ,60	6 ,35	9 ,05	12 ,03	14 ,49	13 ,40	10 ,69	6 ,39	2 ,71	1 ,67
18	— 2 ,95	— 1 ,40	1 ,73	6 ,76	10 ,20	13 ,11	15 ,52	14 ,19	11 ,19	6 ,59	2 ,75	1 ,65
19	— 2 ,95	— 1 ,33	2 ,10	7 ,56	11 ,31	14 ,24	16 ,65	15 ,11	12 ,00	7 ,02	2 ,85	1 ,61
20	— 2 ,86	— 1 ,07	2 ,70	8 ,69	12 ,53	15 ,41	17 ,91	16 ,44	13 ,23	7 ,75	3 ,07	1 ,65
21	— 2 ,50	— 0 ,36	3 ,63	9 ,99	13 ,63	16 ,44	18 ,91	17 ,74	14 ,31	8 ,99	3 ,62	1 ,99
22	— 2 ,11	0 ,40	4 ,70	11 ,25	14 ,61	17 ,39	19 ,82	18 ,99	15 ,88	10 ,29	4 ,39	2 ,45
23	— 1 ,49	1 ,25	5 ,36	12 ,35	15 ,54	18 ,23	20 ,69	20 ,12	17 ,00	11 ,48	5 ,09	3 ,01
Moyennes.	— 2°,05	0°,30	3°,88	10°,03	12°,93	15°,72	18°,20	17°,49	14°,46	9°,40	4°,00	2°,34

Les observations horaires suivantes, faites à Salzufeln, en Westphalie, en 1828, par MM. Rodolphe et Guillaume Brand, qui sont les moyennes des températures des heures homonymes pendant toute l'année, conduisent à un résultat intéressant à constater.

Températures moyennes horaires annuelles.

Heure du matin.	Température moyenne.	Heure du soir.	Température moyenne.
1..........	7°,56	1..........	11°,90
2..........	7 ,30	2..........	11 ,96 (maximum.)
3..........	7 ,01	3..........	11 ,90
4..........	6 ,82 (minimum.)	4..........	11 ,65
5..........	7 ,06	5..........	11 ,25
6..........	7 ,63	6..........	11 ,90
7..........	8 ,30	7..........	10 ,07
8..........	9 ,02	8..........	9 ,52
9..........	9 ,83	9..........	9 ,05
10..........	10 ,53	10..........	8 ,62
11..........	11 ,06	11..........	8 ,20
Midi..........	11 ,60	Minuit..........	7 ,90

La moyenne de toutes ces observations horaires est égale à 9°,45, qui représente la température moyenne annuelle.

Ces observations, comme celles de Leith soumises à une discussion approfondie par M. Brewster, montrent que les demi-sommes des températures observées à des heures du matin et du soir, de même dénomination, ou à des heures homonymes, donnent la moyenne annuelle, comme on peut le voir dans le tableau suivant :

La températ. moyenne ann. de . . . . . . 1 h. du m.	2 H. du matin.	3 H. du matin	4 H. du matin.	5 H. du matin.	6 H. du matin.	7 H du matin	8 H. du matin.	9 H. du matin.	10 H. du matin.	11 H. du matin	12 H. du matin
combinée avec celle de. . . . 1 h. du s.	2 H. du soir.	3 H. du soir.	4 H. du soir.	5 H. du soir.	6 H. du soir.	7 H. du soir.	8 H. du soir.	9 H. du soir.	10 H. du soir.	11 H. du soir.	12 H. du soir.
donne..... 9°,73	9°,63	9°,45	9°,24	9°,20	9°,18	9°,17	9°,27	9°,63	9°,37	9°,63	9°,75

Toutes ces moyennes diffèrent peu, effectivement, de 9°,45, température moyenne annuelle du lieu. Les

plus grandes discordances ont lieu pour les combinaisons des observations de 6 heures et de 7 heures. Si au lieu de prendre la moyenne de deux heures homonymes, on prend la moyenne de 4 observations équidistantes (telles que celles de midi, minuit, 6^h mat., 6^h soir; ou bien 1^h m., 1^h s. 7^h m., 7^h s., etc.), on a des nombres qui ne diffèrent de la moyenne réelle que dans les centièmes de degré.

Il est nécessaire de faire remarquer que les températures moyennes horaires varient avec la direction des vents régnants. Nous citerons, comme exemple, les différences obtenues entre les températures moyennes horaires par un vent quelconque, et les mêmes températures par les différents vents à Halle. (*Kaemtz*, page 161.) M. Kaemtz a pris les heures du matin et de l'après-midi, où la température moyenne est égale à la moyenne dans les différents mois, et les heures de 2^h et de 3^h, qui sont celles du maximum diurne. Les signes + et — indiquent que les quantités trouvées sont au-dessus ou au-dessous de la moyenne de l'ensemble des observations. La ligne variation donne la différence entre la moyenne des trois observations du matin et des trois du soir; le signe + indique que le thermomètre monte, le signe — qu'il descend.

HEURES.	N.	N.-E.	E.	S.-E.	S.	S.-O.	O.	N.-O.
8 matin.	— 1°,26	— 2°,37	— 2°,00	— 0°,50	+ 1°,00	+ 1°,20	+ 1°,06	— 0,86
9 »	— 1 ,50	— 2 ,37	— 1 ,80	+ 0 ,01	+ 1 ,21	+ 1 ,27	+ 0 ,98	— 1 ,26
10 »	— 1 ,62	— 2 ,39	— 1 ,60	+ 0 ,37	+ 1 ,50	+ 1 ,31	+ 0 ,86	— 1 ,48
2 soir.	— 1 ,92	— 2 ,23	— 1 ,11	+ 1 ,25	+ 2 ,15	+ 1 ,23	+ 0 ,34	— 2 ,19
3 »	— 1 ,78	— 2 ,14	— 1 ,05	+ 1 ,28	+ 2 ,21	+ 1 ,25	+ 0 ,28	— 2 ,25
7 »	— 1 ,62	— 1 ,93	— 1 ,24	+ 0 ,86	+ 1 ,84	+ 1 ,21	+ 0 ,34	— 1 ,92
8 »	— 1 ,66	— 1 ,94	— 1 ,29	+ 0 ,62	+ 1 ,79	+ 1 ,22	+ 0 ,34	— 1 ,78
9 »	— 1 ,48	— 1 ,95	— 1 ,35	+ 0 ,52	+ 1 ,71	+ 1 ,26	+ 0 ,39	— 1 ,68
Variation	— 0°,13	+ 0°,13	+ 0°,51	+ 0°,50	+ 0°,54	— 0°,03	— 1°,62	— 0°,59

M. Kaemtz, en comparant dans ce tableau les degrés obtenus le matin et le soir aux heures de la température moyenne de la journée, a trouvé que le thermomètre descend encore un peu par le vent du nord; car, ajoute-t-il : « Tandis que le vent passe régulièrement du « N. au N.-E., ce n'est qu'au N.-N.-E. qu'il vient du « point de l'horizon le plus froid; la température baisse « donc toujours jusqu'à ce qu'il souffle dans cette di- « rection. Par le N.-E. le thermomètre monte, parce « que le vent tend à tourner à l'E., qui est moins froid, « jusqu'à ce qu'il souffle d'un point intermédiaire entre « le S. et le S.-O., point d'où vient le vent le plus « chaud; alors le thermomètre est stationnaire. Mais s'il « passe à l'O. ou au N.-O., il vient de contrées plus « froides, et on observe dans le cours de la journée les « diminutions de température qui en sont la consé- « quence. »

Des lignes isothères, isochimènes et isothermes.

Les températures estivale, hivernale et moyenne de l'année sont indispensables à connaître, non-seulement parce qu'elles servent de base à la répartition de la chaleur sur la terre, mais encore parce qu'elles doivent être prises en considération dans l'étude de la distribution des animaux et des végétaux dans les différentes parties du monde. Nous n'en discuterons l'importance qu'en exposant les climats auxquels ces éléments servent de base : pour l'instant, nous ne traiterons ici que des lignes isothères, isochimènes et isothermes.

Les lignes isothères et isochimènes qu'on a tracées jusqu'ici sont peu complètes, vu le manque d'observation; néanmoins M. Malhmann a donné un tableau renfermant 305 observations que nous rapportons ci-après, et qui pouront servir à les étendre. (M. de Humboldt, *Asie centrale*, tome III.)

LIEUX.	LATITUDE.	LONGITUDE DE PARIS.	HAUTEUR EN MÈTRES au-dessus du niveau de la mer.	TEMPÉRATURES MOYENNES					MOIS LE PLUS FROID.	MOIS LE PLUS CHAUD.	NOMBRE des années d'observation.
				ANNÉE.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.			
Ile Melville	74°47′ N.	113° 8′O.	—	—18,7	—33°,5	—19°,5	2°,8	—18°,0	—35°,8 février.	5°,8 juillet.	1
Ile Ingloolik	69 19 —	83 23 —	—	—16,6	—29,7	—16,8	1,7	—14,0	—33,5 decembre.	3,9 —	1
Ustjansk	70 55 —	136 4 E.	—	—16,6	—38,4	—14,7	9,2	—23,9	—40,3 janvier.	13,7 —	1—3
Port-Bowen	73 14 —	91 15 O.	—	—15,8	—31,7	—21,0	2,7	—11,9	—33,8 —	3,8 —	1
Boothia-Felix	70 2 —	94 10 —	—	—15,7	—33,2	—20,7	3,4	—12,4	—35,6 février.	5,1 —	2—3
Winter-Island	66 11 —	85 31 —	—	—14,0	—29,1	—14,2	1,7	— 8,0	—31,1 —	2,7 août.	1
Fort Entreprise	64 28 —	115 26 —	253	......	—30,9	—13,2	......	— 7,3	—34,2 décembre.	....	1
Jakouzk	62 1 —	126 47 E.	117	— 9,7	—38,9	— 8,3	17,2	— 6,6	—40,5 février.	20,3 juillet.	pl.
Novaja-Semlja	70 37 —	55 27 —	—	— 9,5	—16,0	—15,9	2,0	— 7,9	—23,7 mars.	3,1 août.	1
	73 0 —	51 30 —	—	— 8,4	—19,0	—11,8	3,6	— 6,3	—22,1 février.	5,0 —	1
Fort Franklin	65 12 —	125 33 O.	68	— 8,2	—27,2	—10,0	10,2	— 6,0	—30,2 janvier.	11,2 juillet.	1—2
Fort Reliance	62 46 —	109 1 —	107	......	—29,1	—10,7	......	......	—31,7 —	....	1—2
Spitzberg	80 — —	14 — E.	—	......	......	......	3,4	......	....	4,6 juillet.	1
Mer du Groënland	78 — —	7 — —	—	(— 7,7)	......	— 9,4	1,4	......	....	2,8 —	6—12
Novaja-Semlja	73 57 —	52 28 —	—	— 6,9	—14,1	—10,3	4,2	— 7,4	—17,2 novembre.	5,3 —	1
Mer du Groënland	72 — —	21 — O.	—	......	......	......	1,4	......	....	1,8 août.	1
	80 — —	8 — E.	—	......	......	......	1,4	......	....	2,2 juillet.	1
Nain (Labrador)	57 10 —	64 10 O.	—	— 3,6	—18,5	— 5,8	7,6	2,2	—20,9 février.	9,3 août.	3
Fort Simpson	62 11 —	123 52 —	78	— 3,5	—23,5	— 2,8	15,1	— 2,8	—24,8 janvier.	17,5 juin.	1—3
Enontekis	68 40 —	20 0 E.	435	— 2,7	—17,0	— 3,9	12,6	— 2,7	—17,8 —	14,5 juillet.	4
Casino, sur l'Etna	37 6 —	12 41 —	2990	— 1,3	— 8,6	— 2,7	6,6	— 0,6	— »	»	»
Saint-Bernard	45 50 —	4 45 —	4843	— 1,0	— 7,8	— 2,0	6,1	— 0,4	— 8,7 —	6,8 —	21
Saint-Gothard	46 33 —	6 14 —	2095	— 0,8	— 7,6	— 2,7	6,7	0,0	— 8,4 février.	7,5 août.	10—11
Slatoust	55 8 —	57 8 —	322	— 0,7	—16,6	0,8	15,2	0,2	— 18,0 —	15,8 juillet.	4
Haapakyla	66 27 —	21 27 —	......	— 0,5	—14,2	— 2,3	14,4	0,1	— 15,9 janvier.	16,4 —	30
Irkouzk	52 16 —	101 58 —	409	— 0,2	—17,6	4,5	15,9	— 2,2	—19,5 —	17,5 —	10

Eyafiordur..........	65 40	—	22 0 O.	—	0,0	— 6,2	— 2,2	7,7	1,4	— 7,6	décembre.	8,3	—	2
Cap Nord..........	71 10	—	23 30 E.	—	0,1	— 4,6	— 1,3	6,4	— 0,1	— 5,5	janvier.	8,1	—	1
Uleaborg..........	65 3	—	23 6 —	—	0,7	—11,1	— 2,7	14,3	— 2,2	—13,5	—	16,4	—	6
Umeo..........	63 50	—	17 56 —	—	2,1	—10,2	0,6	14,1	3,1	—11,3	—	16,2	—	23
Kazan..........	55 48	—	46 47 —	58	2,2	—14,3	2,6	17,0	2,8	—16,5	—	18,4	—	12
Hernoesand..........	62 38	—	15 33 —	—	2,3	— 8,1	0,2	13,4	3,6	— 8,7	—	14,8	—	28
Pétersbourg..........	59 56	—	27 59 —	—	3,5	— 8,4	1,7	15,7	4,7	—10,3	—	16,9	—	25
Saint-John's..........	47 34	—	54 58 O.	43	3,5	— 4,9	0,2	12,2	6,5	— 6,2	février.	14,4	août.	5
Moscou..........	55 45	—	35 18 E.	146	3,6	—10,3	6,3	16,8	1,6	—10,6	janvier.	17,6	juillet.	25
Reikiavig..........	64 8	—	24 16 O.	—	4,0	— 1,6	2,4	12,0	3,3	— 2,1	février.	13,5	—	14
Houlouk..........	53 52	—	168 45 —	......	4,1	0,1	2,0	10,5	3,7	— 1,1	décembre.	13,4	août.	1—2
Falun..........	60 39	—	13 25 E.	121	4,4	— 5,5	3,2	14,6	5,3	— 7,4	janvier.	15,8	juillet.	9
Abo..........	60 27	—	19 57 —	......	4,6	— 5,4	2,6	15,7	5,4	— 6,1	—	17,6	—	17
Tambow..........	52 47	—	39 8 —	62	5,1	— 8,7	......	18,4	......	—12,7	—	20,0	—	12
Port-Famine..........	53 38	S.	73 14 O.	—	......	1,1	......	......	5,7	0,6	—	......		1
Upsal..........	59 52	N.	15 18 E.	—	5,2	— 3,7	3,4	15,1	6,2	— 4,9	—	16,3	juillet.	27
					5,3	......	......	......	......	— 5,0	—	16,8	—	83
Soendmoer..........	62 30	—	4 0 —	—	5,3	— 2,7	4,0	13,3	6,5	— 4,4	—	14,3	—	19
Christiania..........	59 54	—	8 25 —	—	5,4	— 3,8	4,0	15,3	5,8	— 4,8	—	16,5	—	10
East-Port..........	44 54	—	69 16 O.	—	5,4	— 5,4	3,6	16,1	7,6	— 6,8	—	17,2	—	6
Stockholm..........	59 21	—	15 43 E.	41	5,6	— 3,6	3,5	16,1	6,5	— 4,5	—	17,6	—	65
Pompey..........	42 56	—	78 25 O.	390	6,1	— 5,3	5,3	17,7	6,8	— 6,2	—	19,0	—	14
Kœnigsberg..........	54 43	—	18 10 E.	—	6,2	— 3,3	5,3	15,9	6,7	— 4,2	—	17,0	—	24
Stift-Tepl..........	49 58	—	10 33 —	643	6,2	— 2,9	6,3	14,7	6,8	— 5,2	—	15,8	—	11
Hohe-Peissenberg....	47 48	—	8 41 —	975	6,2	— 1,6	5,4	14,4	6,5	(— 1,6?	février).	15,0	—	20
Saint-Lawrence..........	44 40	—	77 20 O.	121	6,2	— 6,8	5,9	18,6	7,4	— 7,9	janvier.	20,1	—	12
Halifax..........	44 39	—	65 57 —	—	6,2	— 4,4	2,9	17,2	9,0	— 5,2	—	19,2	—	2—9
Carlstadt..........	59 23	—	11 10 E.	53	6,3	— 2,7	4,7	16,2	6,9	— 3,6	—	17,5	—	10
Wilna..........	54 41	—	22 58 —	117	6,3	— 4,6	5,7	17,6	6,5	— 5,9	—	18,5	—	6
Montreal..........	45 31	—	75 55 O.	......	6,5	— 8,1	6,8	20,6	8,4	— 9,7	—	21,7	—	13
Leadhills..........	55 25	—	6 8 —	390	6,6	0,2	6,4	13,1	6,5	— 0,2	—	14,0	—	10
Hof..........	50 19	—	9 35 E.	487	6,6	— 1,5	5,8	15,9	6,2	— 3,4	—	16,7	—	7
Tegernsée..........	47 42	—	9 25 —	735	6,6	— 1,9	5,7	15,3	7,3	......		......		8
Fort Snelling..........	44 53	—	95 28 O.	240	6,6	— 9,8	8,2	21,3	7,2	—11,9	janvier.	22,4	juillet.	5
Fort Howard..........	44 40	—	89 22 —	185	6,6	— 7,3	5,8	20,5	6,9	— 7,9	décembre.	23,0	—	4
Tilsit..........	55 4	—	19 33 E.	......	6,7	— 3,6	5,9	16,7	7,3	— 5,4	janvier.	17,5	—	20
Hohenelbe..........	50 38	—	13 14 —	458	6,7	— 2,6	6,5	15,6	7,2	— 4,3	—	16,4	—	15
Hohenfurth..........	48 37	—	12 0 —	555	6,7	— 3,3	7,2	16,4	6,0	— 5,0	—	17,5	—	11
Genkingen..........	48 25	—	6 50 —	780	6,8	— 1,6	6,8	14,8	7,1	— 4,1	—	15,7	—	7

LIEUX.	LATITUDE.	LONGITUDE DE PARIS.	HAUTEUR EN MÈTRES au-dessus du niveau de la mer.	TEMPÉRATURES MOYENNES					MOIS LE PLUS FROID.	MOIS LE PLUS CHAUD.	NOMBRE des années d'observation.
				ANNÉE.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.			
Nouvelle-Archangelsk.	57° 3' N.	137°38'O.	......	6°,9	0°,7	5°,2	12°,7	8°,6	— 0°,2 février.	13°,5 août.	3—5
Wexioe	56 53 —	12 25 E.	146	6,9	—2,3	5,3	17,7	7,1	— 2,8 janvier.	18,9 juillet.	34
Braunsberg	54 19 —	17 34 —	—	6,9	—3,8	6,0	15,8	7,4	— 5,3 —	16,5 août.	7
Dover	43 13 —	73 14 O.	......	6,9	—5,0	5,7	19,0	8,0	— 5,5 février.	21,1 juillet.	6—7
Concord	43 12 —	73 49 —	......	6,9	—5,2	6,7	18,5	7,6	— 6,0 janvier.	19,5 —	10
Fayetteville	42 58 —	75 2 —	......	7,0	—5,6	6,0	19,0	7,9	— 6,7 —	19,7 —	7
Ullensvang	60 19 —	4 20 E.	—	7,2	—0,1	6,0	15,6	7,4	— 0,7 —	16,9 —	25
Lund	55 42 —	10 51 —	—	7,2	—1,4	5,4	16,7	8,3	— 1,9 —	17,4 —	54
Freyberg	50 55 —	11 0 —	403	7,2	—1,7	7,2	15,9	7,5	— 3,2 —	16,4 —	9
Alford	57 13 —	5 2 O.	127	7,3	1,9	6,0	13,7	7,4	0,8 —	14,7 —	7
Gotha	50 57 —	8 23 E.	308	7,3	—1,3	7,3	15,5	7,6	— 3,2 —	16,8 —	8
Tabor	49 24 —	12 19 —	429	7,3	—2,7	7,3	16,9	7,7	— 4,6 —	18,0 —	15
Dunfermline	56 5 —	5 46 O.	......	7,4	2,6	6,1	12,9	7,8	— 2,1 —	13,8 —	20
Applegarth-Manse	55 13 —	5 32 —	55	7,4	2,4	6,2	13,4	8,0	1,2 —	14,1 —	13
Utica	43 7 —	77 33 —	146	7,4	—4,0	6,7	19,0	8,4	— 5,1 février.	20,4 —	14
Thorshavn	62 2 —	9 6 —	—	7,5	4,3	5,6	12,2	8,2	3,3 janvier.	13,4 —	2—5
Varsovie	52 13 —	18 42 E.	121	7,5	—2,5	7,0	17,5	8,0	— 4,0 —	18,2 juillet.	26
Dantzig	54 21 —	16 18 —	......	7,6	—1,2	6,7	16,4	8,4	— 2,6 —	17,5 —	26
Zittau	50 54 —	12 28 —	247	7,6	—1,7	7,5	16,5	8,3	— 3,4 —	17,2 —	12
Bayreuth	49 57 —	9 16 —	341	7,6	—1,3	7,9	15,9	8,0	— 2,9 —	16,9 —	19
Wartenberg (Pologne).	51 19 —	15 21 —	146	7,8	—2,0	7,9	17,1	8,4	— 3,7 —	17,8 —	15
Kielse	50 52 —	18 18 —	273	7,8	—1,7	7,8	16,0	8,8	— 3,8 —	16,9 août.	7
Kobourg	50 16 —	8 39 —	220	7,8	—0,9	7,2	17,1	8,2	— 1,7 —	17,6 juillet.	12
Berne	46 57 —	5 6 —	585	7,8	—0,9	7,7	15,8	8,5	— 2,8 —	16,6 août.	20
Goetheborg	57 41 —	9 36 —	—	7,9	—0,3	6,5	16,9	8,7	— 1,1 —	17,8 juillet.	46
Augsbourg	48 22 —	8 34 —	493	7,9	—0,7	8,3	16,6	8,2	— 3,8 —	17,5 —	22

Stromness (Orkneys)..	58 57 —	5 49 O.	......	8,0	4,0	6,5	12,5	9,0	3,4	—	13,0	—	12
Praestoe...........	55 7 —	9 43 E.	—	8,0	—0,3	6,5	16,2	9,4	—1,3	—	16,8	août.	10
Cracovie...........	50 4 —	17 37 —	201	8,0	—3,3	6,9	19,1	8,0	—5,3	—	19,6	—	13
Landskrona.........	49 55 —	14 17 —	331	8,0	—2,3	8,3	17,7	8,1	—4,6	—	18,8	juillet.	14
Kinfauns-Castle......	56 24 —	5 39 O.	45	8,1	3,3	7,4	14,1	8,7	2,7	—	14,9	—	27
Breslau............	51 6 —	14 42 E.	140	8,1	—1,0	7,2	17,3	8,1	—1,5	—	19,1	—	18
Clunie-Manse........	57 12 —	4 55 O.	58	8,2	—3,2	7,9	14,8	7,9	2,5	—	15,2	—	28
Copenhague.........	55 41 —	10 14 E.	—	8,2	—0,4	6,5	17,2	9,3	—1,4	—	18,2	—	52
Stralsund...........	54 19 —	10 45 —	—	8,2	—0,2	7,0	16,5	9,3	—1,6	—	17,9	—	11
Medfield...........	42 15 —	73 20 O.	......	8,2	—3,0	6,8	19,6	9,4	—4,6	—	20,5	—	12
Apenrade..........	55 3 —	7 5 E.	—	8,3	0,6	6,9	16,2	9,0	—0,4	—	16,9	—	16
Kendal............	54 17 —	5 6 O.	43	8,3	2,9	7,5	14,5	8,5	1,6	—	14,9	—	21
Alderley-Plectory.....	53 20 —	4 40 —	......	8,3	2,7	7,6	14,0	8,9	2,1	—	14,4	—	10
Arnstadt...........	50 50 —	8 37 E.	292	8,3	—1,3	8,5	17,2	8,9	......	......	......	......	10
Fulda.............	50 34 —	7 24 —	273	8,3	—2,6	8,1	18,7	8,9	—3,5	janvier.	19,6	août.	11
Kremsmunster.......	44 3 —	11 48 —	361	8,3	—1,9	......	17,6	......	......	......	......	......	»
Carlisle...........	54 54 —	5 17 O.	—	8,4	3,0	7,5	14,2	8,7	2,3	janvier.	14,9	juillet.	24
Giengen...........	48 37 —	7 55 E.	481	8,4	0,0	8,9	17,0	8,0	—2,9	—	17,1	—	16
Swinemunde........	53 51 —	11 57 —	—	8,5	—0,7	7,4	17,4	9,5	—2,6	—	18,4	—	9
Dresde............	51 3 —	11 24 —	121	8,5	—0,4	8,4	17,2	8,4	—2,0	—	18,0	—	10
Iena..............	50 56 —	9 17 —	162	8,5	—0,7	8,9	16,5	9,1	—2,8	—	18,1	—	10
Saint-Gall.........	47 26 —	7 2 —	......	(8,5)	0,0	7,7	(17,2)	8,9	—1,7	—	(19,8)	—	10
Edimbourg........	55 57 —	5 32 O.	88	8,6	3,6	7,6	14,4	8,9	2,9		15,0	—	17
Cuxhaven..........	53 53 —	6 24 E.	—	8,6	0,3	7,5	17,2	9,2	—0,4	—	17,5	—	18
Hambourg..........	53 33 —	7 38 —	—	8,6	0,3	8,0	17,0	8,8	—1,3	—	17,5	—	19
Berlin.............	52 31 —	11 3 —	39	8,6	—0,8	8,0	17,3	8,8	—2,4	—	18,0	—	25
				8,6	—0,7	8,4	17,6	9,1	—3,1	—	18,3	—	22
Ratisbonne.........	49 1 —	9 46 —	335	8,6	—1,4	9,4	17,9	8,7	—2,8	—	18,9	—	59
Tubingue..........	48 31 —	6 43 —	331	8,6	—0,2	8,6	17,1	8,9	—2,2	—	17,8	—	13
New-Malton........	54 8 —	3 7 O.	—	8,7	2,5	......	15,1	......	1,9	—	15,9	—	7—9
Manchester........	53 29 —	4 35 —	47	8,7	2,8	7,9	14,8	9,2	2,1	—	15,2	—	25
Andover...........	42 38 —	73 27 —	58	8,7	—2,9	7,2	20,6	9,6	—4,2	—	21,3	—	11
Sagan.............	51 39 —	12 59 E.	123	8,8	—2,6	7,0	18,2	8,2	—3,7	—	18,9	—	7
Halle.............	51 31 —	9 37 —	111	8,8	0,0	8,6	17,5	9,1	—2,3	—	19,2	—	5—10
Saaz..............	50 20 —	11 13 —	257	8,8	—1,4	9,1	18,3	9,1	—2,7	—	19,5	—	13
Andechs...........	47 58 —	8 52 —	702	8,8	—1,2	8,8	18,6	9,1	—1,6	—	19,3	—	8
Munich............	48 9 —	9 14 —	526	8,9	—0,4	9,0	17,4	9,1	—1,5	—	18,0	—	32
Salem.............	42 31 —	73 14 O.	—	8,9	—2,6	7,2	20,6	10,5	—3,8	—	21,9	—	45
Cambridge(États-Unis)	42 22 —	73 28 —	—	8,9	—2,8	7,4	20,7	10,1	—4,1	—	22,0	—	23

LIEUX.	LATITUDE.	LONGITUDE DE PARIS.	HAUTEUR EN MÈTRES au-dessus du niveau de la mer.	TEMPÉRATURES MOYENNES					MOIS LE PLUS FROID.	MOIS LE PLUS CHAUD.	NOMBRE des années d'observation
				ANNÉE.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.			
Erfurt	50°59′ N.	8°42′ E.	209	9°0	0°6	8°5	17°3	9°5	— 0°,7 janvier.	17°,7 juillet.	17
Innsbruck	47 16 —	9 4 —	526	9,0	—1,9	10,0	18,3	9,6	— 3,8 —	18,4 —	51
Goettingue	51 32 —	7 36 —	132	9,1	0,6	.....	17,6	.....	.....	.....	0/0
Wangen	48 46 —	6 55 —	[illegible]	9,1	0,4	9,3	17,9	9,4	.....	.....	13
Rochester	43 8 —	80 11 O.	156	9,1	—2,5	8,5	20,3	10,2	— 3,0 février.	22,3 juillet.	10
Albany	42 39 —	76 5 —	39	9,2	—3,0	8,7	20,9	9,7	— 3,9 —	22,2 —	17
Salzuflen	52 5 —	6 25 E.	97	9,3	1,5	8,9	17,3	9,6	— 0,6 janvier.	18,1 —	16
Elberfeld	51 16 —	4 49 —	131	9,3	2,2	8,8	16,3 ?	9,7	1,1 —	17,2 —	12
Nicolaieff	46 58 —	29 39 —	—	9,3	—3,4	9,6	21,8	10,0	— 5,3 —	22,6 —	15
Boston	42 21 —	73 24 O.	.....	9,3	—1,6	7,7	20,5	10,4	— 3,3 —	21,8 —	10
Dublin	53 23 —	8 41 —	—	9,5	4,6	8,4	15,3	9,8	4,3 —	16,0 —	13
Munster	51 58 —	5 18 E.	63	9,5	2,2	8,7	16,8	10,1	0,7 —	17,4 —	10
Prague	50 5 —	12 6 —	191	9,5	—0,4	9,6	18,9	9,8	— 2,4 —	20,2 —	15
Lausanne	46 31 —	4 18 —	507	9,5	0,5	9,2	18,4	9,9	— 1,0 —	18,7 août.	10
Zwanenburg	52 15 —	2 0 —	—	9,6	2,6	8,4	16,9	10,6	1,4 —	17,4 juillet.	40
Pres-Londres	51 31 —	2 26 O.	.....	9,6	3,2	9,0	16,4	10,0	1,7 —	17,3 —	24
Stuttgard	48 46 —	6 51 E.	248	9,6	0,8	10,0	17,8	9,7	— 1,2 —	18,8 —	40
New-Bedford	41 38 —	73 16 O.	.....	9,6	—0,8	7,7	20,1	11,5	— 1,9 —	21,0 —	5
Leyde	52 10 —	2 9 E.	—	9,7	2,4	8,4	17,2	10,5	1,2 —	17,9 —	19
Cheltenham	51 55 —	4 24 O.	.....	9,7	3,8	9,2	15,8	10,1	2,7 —	16,8 —	13
Genève	46 12 —	3 49 E.	396	9,7	1,2	9,5	17,9	10,2	— 0,4 —	18,6 —	40
St.-Jean de Maurienne	45 18 —	4 4 —	546	9,7	0,2	10,0	18,7	9,8	— 0,8 —	19,9 —	12
Sympheropol	45 0 —	31 50 —	259	9,7	0,5	10,6	19,6	8,0	— 0,3 —	20,8 —	13
Council-Bluffs	41 25 —	98 3 O.	244	9,7	—5,2	10,6	23,2	10,3	— 6,9 —	23,9 —	5
Francfort-sur-Mein	50 7 —	6 21 E.	117	9,8	1,2	9,9	18,3	10,0	— 0,4 —	18,9 —	30
Strasbourg	48 35 —	5 25 —	146	9,8	1,1	10,0	18,1	10,0	— 0,4 —	18,8 —	32

Bâle	47 34 N.	5 15 —	253	9,8	0,4	9,8	18,4	9,7	— 1,0 —	19,3 —	11
Haarlem	52 23 —	2 18 E.	—	10,0	2,8	9,2	17,0	11,0	1,0 —	17,7 —	18
Trèves	49 46 —	4 18 —	156	10,0	1,9	10,0	17,8	10,1	0,0 —	18,7 —	11
Maëstricht	50 51 —	3 21 —	49	10,1	1,9	10,0	18,0	11,1	0,0 —	18,9 —	16
Wurzbourg	49 48 —	7 36 —	172	10,1	1,6	10,2	18,7	9,7	— 0,9 —	19,6 —	27
Vienne	48 13 —	14 3 —	156	10,1	0,2	10,5	20,3	10,5	— 1,6 —	20,7 —	24—14
Fort George	46 18 —	125 20 O.	......	10,1	3,8	9,0	15,5	12,0	2,0 —	16,3 août.	2
Fort Wolcott	41 29 —	73 40 —	—	10,1	—0,1	8,4	20,6	12,2	— 1,3 —	22,2 juillet.	5
Bruxelles	50 51 —	2 2 E.	58	10,2	2,5	10,1	18,2	10,2	1,2 —	18,8 —	36
Carlsruhe	49 1 —	6 5 —	113	10,2	1,1	10,4	18,9	10,2	— 0,5 —	19,7 —	38
Mannheim	49 29 —	6 8 —	92	10,3	1,5	10,4	19,5	9,8	0,9 —	20,2 —	12
Bade	47 30 —	16 43 —	156	10,3	—0,6	10,4	21,1	10,5	— 1,9 —	21,7 —	27
Londres	51 31 —	2 26 O.	—	10,4	4,2	9,5	17,1	10,7	3,0 —	17,8 —	40
Lyme-Regis	50 43 —	5 16 —	—	10,4	5,5	9,2	15,2	11,6	4,5 —	15,8 août.	13
Érasmus-Hall	40 37 —	76 18 —	—	10,7	0,4	9,3	21,3	11,8	— 0,5 février.	22,8 juillet.	14
Paris	48 50 —	0 0 —	64	10,8	3,3	10,3	18,1	11,2	1,8 janvier.	18,9 —	33
Montmorency	49 0 —	0 2 O.	140	10,9	2,8	10,6	18,7	11,4	0,9 —	19,7? —	33
Gosport	50 48 —	3 26 —	—	11,0	5,0	10,1	17,1	11,9	3,9 —	17,8 —	16
Plimouth	50 22 —	6 28 —	—	11,1	6,9	10,1	16,0	11,7	5,9 —	16,6 —	11
Penzance	50 7 —	7 53 —	—	11,1	6,6	9,9	16,5	12,1	5,7 —	17,2 —	21
Fort Columbus	40 42 —	76 29 —	—	11,2	—0,1	9,9	22,5	12,6	— 0,9 février.	24,4 —	4—5
Hobarttown	42 45 S.	145 15 E.	—	11,3	5,6	11,6	17,3	10,9	4,5 janvier.	17,3 —	1
Germantown	40 3 N.	77 37 O.	62	11,3	0,0	10,3	22,8	12,1	— 1,1 —	23,8 —	9
Fort Vancouver	45 38 —	122 34 —	......	11,5	4,2	11,0	18,2	12,9	1,7 —	19,1 août.	3—4
Sevastopol	44 36 —	31 12 E.	49	11,5	1,8	10,2	21,7	12,6	0,6 —	22,4 juillet.	15
La Rochelle	46 9 —	3 28 O.	—	11,6	4,2	10,6	19,4	11,5	2,9 décembre.	20,2 —	11
Marietta	39 25 —	83 50 —	195?	11,6	0,8	12,3	21,9	11,6	0,0 janvier.	22,9 —	11
Baltimore	39 17 —	78 58 —	......	11,6	0,4	10,4	23,1	12,9	— 0,6 —	24,0 —	8
Turin	45 4 —	5 22 E.	279	11,7	0,8	11,7	22,0	12,1	— 0,6 —	22,9 août.	30
Darjiling	27 0 —	86 4 —	2124	12,0	5,4	12,4	16,3	13,3	4,4 —	16,5 —	2
Middletown	40 24 —	76 33 O.	......	12,1	2,2	11,3	21,1	13,6	....	....	3
Cincinnati	39 6 —	86 47 —	162	12,2	0,5	12,4	22,8	12,8	— 1,2 janvier.	23,6 juillet.	9
Padoue	45 24 —	9 32 E.	—	12,5	2,8	12,1	21,9	13,0	1,8 —	22,9 —	37
Pavie	45 11 —	6 49 —	88	12,7	2,2	12,6	22,8	13,2	0,7 —	23,6 —	12
Péking	39 54 —	114 9 —	97	.....	—1,0	14,8	.....	....	— 2,3 —	....	1
				12,7?	—3,2?	13,5	28,1?	12,4	— 4,1 ? —	29,1 ? juin.	6
Washington	38 53 —	79 22 O.	......	12,7	2,3	10,2	21,7	13,5	0,9 —	25,6 juillet.	6
Milan	45 28 —	6 51 E.	146	12,8	2,1	13,0	22,7	13,2	0,6 —	23,7	70
Toulouse	43 36 —	0 54 O.	152	12,9	5,2	11,8	19,9	13,9	4,1 ?	21,5 août.	8

LIEUX.	LATITUDE.	LONGITUDE DE PARIS.	HAUTEUR EN MÈTRES au-dessus du niveau de la mer.	TEMPÉRATURES MOYENNES					MOIS LE PLUS FROID.	MOIS LE PLUS CHAUD.	NOMBRE des années d'observation.
				ANNÉE.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.			
St.-Louis (Miss)	38°36' —	91°56'O.	170	13°,0	0°,7	12°,9	24°,1	14°,4	— 1°,2	25°,7 juillet.	10
Trieste	45 39 —	11 26E.	88	13,2	4,1	12,1	21,9	13,7	3,5	22,6	18
Sienne	43 03 —	9 0	325	13,4	5,2	12,4	21,7	14,0	4,4 janvier.	22,7	5
Brescia	45 33 —	7 54	152	13,5	3,7	13,9	22,4	14,0	2,4	23,6	17
Venise	45 26 —	10 0	—	13,7	3,3	12,6	22,8	13,3	1,8	23,9	19,7
Constantinople	41 0 —	26 39	......	13,7	4,8	11,0	23,0	15,8	....	....	1—3
Bordeaux	44 50 —	2 55O.	—	13,9	6,1	13,4	21,7	14,4	5,0 janvier.	22,9 juillet.	10
Mafra	38 56 —	11 41	228	13,9	9,6	12,7	18,2	15,1	9,2	19,7	4
Otacamound	11 55 —	74 30E.	2241	13,9	11,4	16,3	14,1	13,8	11,1	16,9 avril.	2—4
Moussouri	30 27 —	75 42	1910	14,0	5,5	15,9	19,8	14,8	4,8	20,0 juin.	2—3
Montpellier	43 36 —	1 32	—	14,1 15,3?	 6,9	 13,8	 24,4	 16,1	.... 5,6 janvier.	.... 25,7 juillet.	14 10—12
Marseille	43 18 —	3 2	45	14,1	6,9	12,9	21,4	14,7	5,2	22,8	16—10
Bologne	44 30 —	9 1	82	14,2	2,8	14,5	25,2	14,3	1,2	26,4	8—10
Camajore	43 55 —	8 0	......	14,2	6,7	13,6	21,9	14,8	6,0	23,1	41
Madrid	40 25 N.	6 2E.	663	14,2	5,6	14,2	23,4	13,7	....	....	2—3
Avignon	43 57 —	2 28	—	14,4	5,8	13,0	21,1	14,6	4,8 janvier.	23,8 août.	25
Caserna	43 40 —	8 10	......	14,6	6,8	13,7	22,5	15,1	5,4	23,5 juillet.	8
Lucques	43 51 —	8 10	......	14,9	4,6	16,1	23,6	15,3	4,0 —	24,6 —	36
Santa-Fe de Bogota	4 36 —	76 34O.	2631	15,0	15,1	15,3	15,3	14,5	14,6 décembre.	16,1 février.	1—2
Toulon	43 7 —	3 36E.	—	15,1	8,6	13,3	22,3	16,3	7,5 janvier.	23,2 juillet.	11—12
Lahoughat	29 23 —	79 56	1666	15,2	7,5	15,4	21,7	16,3	7,0	21,9	2
Florence	43 47 —	8 55	64	15,3	6,8	14,7	24,0	15,7	5,3	25,2	12
Rome	41 54 —	10 8	53	15,4	8,1	14,1	22,9	16,5	7,2	23,9	30
Perpignan	42 42 —	0 34	53	15,5	7,2	14,4	23,9	16,2	5,5	23,5	6
Nice	43 42 —	4 57	—	15,6	9,3	13,3	22,3	17,2	8,3	23,6 août.	20

Quito	0 14 S.	81 05 O.	2914	15,6	15,4	15,7	15,6	17,5	14,8 juillet.	16,3 mars.	2—3
Près Naples	40 52 N.	11 55 E.	150	15,7	8,7	14,3	23,5	16,3	7,9 janvier.	24,6 août.	18
				16,0	8,8	14,7	23,6	16,8	7,7 janvier.	25,1 —	8
Chapel-Hill	35 54 —	81 19 O.	—	15,7	5,4	15,4	25,2	16,7	2,4	25,6 —	3
Cagliari	39 13 —	4 6 E.	101	16,3	10,2	14,0	22,4	18,3	8,9	23,9 août.	3
Naples	40 51 —	11 55	55	16,7	9,9	15,6	23,9	17,3	9,0	25,0	8
				16,4	9,8	15,2	23,8	16,8	9,2	24,5	18
Lisbonne	38 42 —	11 29 O.	72	16,4	11,3	15,5	21,7	17,0	11,2	22,3 juillet.	5
Mexico	19 26 —	101 26	2271	16,6	13,0	18,1	19,1	16,2	12,3	19,7 juin.	2
Buenos-Ayres	34 37 —	60 44	......	16,9	11,4	15,2	22,8	18,1	11,0	29,8 août.	1—4
Barcelone	41 22 —	0 9 —	......	17,0	10,0	15,5	24,5	17,8	9,2 —	25,5 —	55
Laguna (Téneriffe)	28 30 —	18 39 —	546	17,1	13,6	15,4	20,2	18,9	12,9	21,7 —	8
Palerme	38 7 —	11 1 E.	55	17,2	11,4	15,0	23,5	19,0	10,7 février.	24,6 —	39
Constantine	36 20 —	4 14 —	......	17,2	10,2	12,3	26,6	19,7	....	....	1
Kathmandou	27 42 —	85 20 —	1413	17,3	8,4	18,4	24,3	18,2	7,0 janvier.	24,9 juillet.	2—3
Abbeville (Caroline)	34 10 —	84 46 O.	......	17,5	8,3	18,7	26,7	16,3	....	....	1
Alger	36 47 —	0 43 —	—	17,8	12,4	17,2	23,6	21,4	(14,5 mars)	24,7 août.	4
Gibraltar	36 7 —	7 41 —	......	17,9	13,8	17,3	22,7	17,8	13,7 février.	23,5 juillet.	2
Nicolosi	37 35 —	12 46 E.	706	18,0	10,7	16,6	25,9	18,7	10,1 —	27,8 août.	5—7
Canea	35 29 —	21 40 —	......	18,0	12,4	15,6	25,2	18,9	11,9 janvier.	27,5 —	1—2
Paramatta	33 50 S.	148 50 —	—	18,1	12,5	19,2	23,3	18,2	11,7 —	24,2 juin.	3
Savannah	32 5 N.	83 27 O.	......	18,1	10,9	18,0	25,1	18,3	....	....	5
Smyrne	38 26 —	24 48 E.	......	18,2	11,1	14,6	26,0	21,1	....	....	1
Nanga-saki	32 45 —	127 32 —	......	18,3	8,4	15,5	27,7	21,6	....	....	2
Près de Natchez	31 34 —	93 45 O.	58	18,3	10,0	19,1	25,4	18,6	8,8 janvier.	26,2 juillet.	9
Funchal	32 38 —	19 15 —	—	18,7	16,3	17,5	21,1	19,8	15,7 —	22,3 août.	6
Messine	38 11 —	13 14 E.	—	18,8	12,8	16,4	25,1	20,7	12,3 —	26,2 —	5—6
Cap de B.-Espérance	33 55 —	16 8 —	—	19,1	14,8	18,6	23,4	19,4	14,3 —	24,1 —	7—11
Montevideo	34 54 S.	58 33 O.	......	19,3	14,1	18,1	25,2	20,0	13,3 décembre.	26,7 juillet.	1
Smithville	34 0 N.	80 25 —	......	19,3	11,4	18,9	26,7	20,1	10,7 février.	27,5 —	5
Nouvelle-Orléans	29 58 —	92 37 —	......	19,4	11,8	18,9	26,5	20,4	11,4 —	26,7 —	4
Catane	37 30 —	12 40 E.	—	19,6	12,6	17,5	26,9	21,4	11,3 janvier.	28,4 août.	4—7
St-Georges (Bermudes)	32 20 —	67 10 O.	—	19,7	15,1	17,6	24,0	22,2	14,4 —	24,9 septembre.	1
Bâton-Rouge	30 26 —	93 25 —	—	19,7	11,7	20,7	27,0	19,9	11,2 —	27,7 juin.	2
Jesup-Cantonm.	31 30 —	96 9 —	53	20,2	11,8	20,7	28,3	19,8	11,3 février.	28,9 août.	3
Tunis	36 48 —	7 51 E.	—	20,3	13,2	18,3	28,3	21,9	11,7 janvier.	30,3 —	3—4
Clinch-Cant.	30 24 —	89 34 O.	......	20,4	12,0	21,1	28,8	20,7	11,0 février.	28,0 juillet.	3
Fort St.-Philippe	29 29 —	91 41 —	—	20,8	12,4	21,4	28,3	22,6	....	....	2—1
Fernandina	30 35 —	84 55 —	—	21,1	15,7	21,1	26,1	21,7	....	....	2—1

LIEUX.	LATITUDE.	LONGITUDE DE PARIS.	HAUTEUR EN MÈTRES au-dessus du niveau de la mer.	TEMPÉRATURES MOYENNES					MOIS LE PLUS FROID.	MOIS LE PLUS CHAUD.	NOMBRE des années d'observation.
				ANNÉE.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.			
Canton	23° 8′ —	110°56′ E.	—	21°,0	12°,7	21°,0	27°,8	22°,7	11°,4 janvier.	28°,3 juillet.	10
				21,6	13,7	21,8	28,2	22,5	13,3 —	28,5 juin.	3
Las-Palmas (Canaries)	28 0 —	17 51 O.	—	21,8	18,0	19,4	23,8	26,2	17,8 —	29,2 octobre.	12
Ste-Croix-de-Ténériffe	28 28 N.	18 36 O.	—	21,9	18,1	21,3	24,9	23,4	17,7 —	26,1 août.	2—3
Fort King	29 3 —	84 30 —	......	22,0	16,5	21,4	28,1	21,7	......	......	1
Caracas	10 31 —	69 25 —	887	22,0	20,9	21,8	23,4	22,2	20,0 février.	24,0 juillet.	1—2
Sainte-Augustine	29 48 —	83 55 —	......	22,3	15,3	21,9	28,2	24,0	......	......	1
Le Caire	30 2 —	28 55 E.	......	22,4	14,7	22,0	29,2	23,5	13,6 janvier.	29,6 août.	3
Scharanpour	29 57 —	75 23 —	308	22,4	12,2	24,8	30,0	22,4	11,1 —	32,2 juin.	1
Cant-Brooke	27 57 —	84 55 O.	—	22,4	16,2	22,7	26,7	24,0	......	......	1
Macao	22 11 —	11 14 E.	—	22,5	16,4	21,1	28,3	24,1	14,5 février.	26,6 juillet.	2—5
Candy	7 18 —	78 30 —	513	22,7	22,3	23,5	22,8	22,4	21,8 janvier.	24,2 mai.	5—6
Ambala	30 25 —	174 25 —	331	22,8	13,2	25,4	30,1	22,6	11,7 —	31,9 juin.	3—4
Ubajoy	23 —	84 45 —	94	23,0	18,3	21,7	28,4	23,9	16,8 décembre.	28,7 juillet.	4
Rio-Janeiro	22 55 S	45 36 O.	......	23,1	20,3	22,5	26,1	23,6	19,6 janvier.	26,7 —	7—9
Honorourou	21 19 —	60 21 —	......	23,7	21,6	23,0	25,5	24,8	21,3 —	25,9 août.	2—3
Nasirabad	26 18 N.	72 25 E.	458	24,5	15,6	27,6	30,0	24,7	14,5 décembre.	32,4 mai.	4
St.-Louis (Sénégal)	16 1 —	118 53 O.	—	24,6	21,1	21,4	27,6	28,2	19,9 février.	30,8 septembre.	1
Key-West	24 34 —	84 13 —	—	24,7	21,5	24,2	27,9	25,5	20,8 janvier.	28,1 août.	6—8
Port-Louis	20 10 S.	55 8 E.	—	24,9	21,6	23,8	28,1	26,0	21,1 février.	28,4 —	10—6
Pounah	18 30 N.	72 —	546	24,9	21,5	26,7	26,1	25,3	20,8 décembre.	27,9 mai.	4
Abouscheher	28 15	48 34 —	......	25,0	16,5	23,8	33,3	26,5	15,4 —	34,3 juillet.	1
Delta de l'Indus	24 44 —	65 57 —	......	......	17,8	......	......	......	17,2 février.	......	1
Fouttigourh	27 22 —	77 12 —	181	25,0	15,3	28,5	31,7	24,5	14,1 janvier.	35,0 juin.	2
La Havane	23 9 —	84 43 O.	—	25,0	22,6	24,6	27,4	25,6	21,9 —	27,5 août.	8
Saint-Denis	20 52 S.	53 10 E.	43	25,0	25,6	24,9	26,7	25,6	22,1 —	27,1 —	2

Vera-Cruz	19 12 N.	98 29 O.	—	25,0	21,5	25,0	27,5	26,0	21,2 —	27,8 mai.	13
Seringapatam	12 45 —	74 21 E.	43	25,1	22,9	28,5	24,5	24,4	21,6 —	29,4 —	2
Benarès	25 19 —	80 35 —	—	25,4	16,3	30,0	29,6	24,1	15,2 décembre.	33,4 —	4
Matanzas	23 2 —	83 58 O.	735	25,5	22,5	25,8	27,6	26,2	21,5 fevrier.	27,8 juillet.	3
Ava	21 40 —	113 40 E.	97	25,7	20,4	27,7	28,7	26,2	18,9 janvier.	30,1 avril.	1
Calcutta	22 35 —	86 0 —	35	28,5	19,9	28,1	28,5	26,1	18,4 —	29,9 mai.	17—8
Bombay	18 56	70 34 —	97	26,0	23,2	27,2	28,1	27,3	22,4 —	29,3 —	2
Jamaïque	17 50	79 2 O.	—	26,1	24,6	25,7	27,4	26,6	24,4 —	27,6 juillet.	5
Tortola	18 27 —	67 0 —	—	26,2	25,5	25,2	27,0	26,8	24,2 mars.	27,3 août.	3
Kobbe	14 11 —	25 48 E.	......	26,5	19,9	28,7	30,0	27,4	18,8 janvier.	30,3 juillet.	2
Paramaribo	5 45 —	57 33 O.	253	26,5	(25,9)	(26,3)	26,9	28,2	25,6 février.	28,6 septembre.	1—3
Sinkapour	1 17 —	101 30 E.	487	26,5	25,9	26,9	27,1	26,7	25,6 janvier.	27,4 juin.	6
St.-Barthélemy	17 53	65 20 O.	......	26,6	26,1	26,6	27,4	26,4	25,9 fevrier.	28,5 juillet.	2
Batavia	6 9 S.	104 33 E.	......	26,8	26,2	26,8	27,2	27,1	25,9 janvier.	27,8 juin.	1
Fort Dundos	11 25 —	127 45 O.	—	27,0	24,0	27,5	28,8	27,8	22,3 —	29,3 —.	1
Anjarakandy	11 40 N.	73 20 E.	—	27,2	26,9	29,0	26,1	26,7	25,7 juillet.	29,8 avril.	10—13
Christiansborg	5 24 —	2 10 O.	—	27,2	27,4	29,0	25,5	27,0	24,6 août.	29,2 —	3—4
St.-Luis de Maranhâo	2 31 S.	46 36 —	—	27,2	27,0	27,0	26,9	26,4	26,3 octobre.	27,1 juillet.	2—1
Cumana	10 28 N.	66 30 —	—	27,4	27,0	28,6	28,1	....	26,9 janvier.	29,2 mai.	1
Trinconomale	8 34 —	79 2 —	—	27,4	25,7	28,4	28,9	27,2	25,4 —	29,2 juin.	4—3
Côte de Guinée	5 30 —	2 —	—	27,4	28,1	28,3	26,4	27,0	25,6 août.	28,8 février.	1—2
Nagpour	21 9 —	76 51 E.	—	27,5	22,7	32,9	28,2	26,4	21,9 janvier.	35,7 mai.	3
Madras	13 5 —	77 57 —	—	27,8	24,8	28,6	30,2	27,5	24,1 —	31,3 juin.	25
Kouka	13 10 —	12 10 —	273	28,2	23,8	32,6	29,0	27,2	20,6 décembre.	33,7 avril.	1—2
Karikal	10 55 —	77 24 —	—	28,7	26,4	30,0	29,9	28,6	25,5 —	13,5 mai.	1
Rio-Hacha	11 28 —	75 20 O.	351	....	27,6	28,5	....	....	27,4 janvier.	(29,1 juin).	1
Maracaybo	11 19 —	76 29 —	......	29,0	27,8	29,5	30,4	29,5	27,3 —	30,5 août.	1
Masfaoua (Abyssinie)	15 36 —	37 9 E.	—	(31,0)	26,7	29,5	....	32,0	25,5 —	(33,8 septembre)	1

Les lignes isochimènes et isothères qui ont été tracées jusqu'ici, en raison même des causes qui exercent sur elles une influence, ne sont pas à beaucoup près parallèles à l'équateur. Les premières s'abaissent vers le sud lorsque l'on s'éloigne des côtes occidentales de l'Europe, ce qui montre qu'à latitude égale les hivers sont plus rigoureux à mesure que l'on marche vers l'est. Les secondes ont une allure opposée; elles se relèvent vers le pôle, en allant de l'ouest à l'est : ainsi les étés deviennent plus chauds. Dans l'intérieur des terres, les moyennes estivales sont à peu près les mêmes à latitude égale. Ces observations s'appliquent également à l'Amérique, et doivent être prises en considération dans la distribution géographique des animaux et des végétaux. En effet, les quadrupèdes ne pouvant émigrer comme les oiseaux, évitent les contrées extrêmes; en faisant donc passer une ligne par les points qui limitent au nord la région habitée par une même espèce animale, on trouve, comme l'a montré M. C. Ritter, que cette ligne coïncide avec une isochimène.

Les végétaux présentent des limites semblables : quelques exemples suffiront pour le prouver. La culture des céréales, qui souffre peu de la durée et de la rigueur de l'hiver, est fortement influencée, au contraire, par la température estivale; il s'ensuit que les courbes qui indiquent leur limite septentrionale sont parallèles aux lignes isothères; ainsi la culture du froment exigeant une température estivale de 18°, sa limite septentrionale se trouve sous la ligne isothère relative à cette température.

Quant aux végétaux arborescents qui sont peu impressionnés par les froids de l'hiver, mais qui exigent des étés chauds pour la maturation de leurs fruits, leur limite sur la côte occidentale de l'Europe dépend également des courbes isothères; nous citerons comme exemple les limites de la culture de la vigne. Cette culture, en effet, ne s'étend pas, sur les côtes de France, au delà de 47° 30′ de latitude, et, dans l'intérieur des

terres, elle a lieu jusque vers 49° et même 50° 20′; à Cologne, en Allemagne, elle ne dépasse pas 51°.

Des lignes isothermes.—Les températures moyennes annuelles sont influencées, à latitude égale, par un grand nombre de causes que nous n'indiquerons qu'après avoir exposé les lignes isothermes; mais comme cette température varie dans le même lieu avec la hauteur, on est forcé de la réduire au niveau de la mer, suivant l'élévation des points que l'on considère : réduction qui exige que l'on connaisse la loi de la diminution de la température avec la hauteur, et dont nous parlerons dans le paragraphe suivant.

Le premier tracé des lignes isothermes est dû à M. de Humboldt, qui a rendu un grand service à la météorologie en fournissant un moyen de suivre les lois de la distribution de la chaleur sur la surface du globe. A l'époque où il publia son travail, les observations n'étaient pas encore assez nombreuses, surtout dans les régions polaires et à la surface des mers, pour que l'on pût y accorder une entière confiance. Aujourd'hui, grâce aux expéditions scientifiques qui ont sillonné les mers et nous pouvons ajouter les terres dans tous les sens, on a réuni un grand nombre de matériaux qui permettent de compléter ce travail. M. de Humboldt a divisé l'hémisphère boréal, sous le rapport des lignes isothermes, depuis l'équateur jusqu'au pôle, en dix zones.

1re zone de 28° à 25° de température centigrade. } zone torride.

2e	zone	de 25°	à	20°
3e	—	de 20°	à	15°
4e	—	de 15°	à	10°
5e	—	de 10°	à	5°
6e	—	de 5°	à	0°
7e	—	de 0°	à	— 5°
8e	—	de — 5°	à	— 10°
9e	—	de — 10°	à	— 15°

10e zone comprenant les régions polaires.

Cette grande division est adoptée aujourd'hui et nous

servira de guide dans la description des lignes isothermes.

M. Kaemtz avait donné, en 1831, une nouvelle carte de lignes isothermes ; depuis cette époque, il a modifié son travail en profitant des observations faites dans l'intérieur des continents et dans les régions polaires. M. Berghaus, en 1838, antérieurement à ce dernier travail, a publié, dans son *Atlas physique*, une carte des lignes isothermes, sur laquelle se trouve le tracé de M. de Humboldt, modifié par un grand nombre d'observations faites depuis. La planche V, qui est relative aux courants marins, représente aussi les isothermes de M. Berghaus, tracées sur une carte suivant la projection de Mercator ; en suivant leur courbure, on voit l'influence énorme qu'exercent les continents sur leur direction. La ligne ponctuée est l'équateur de chaleur, formé de la réunion de tous les points dont la température est un maximum. Cette ligne s'écarte peu de l'équateur terrestre et le coupe en deux points ; son tracé, vu le manque d'observations, n'est pas encore bien arrêté. Sous l'équateur, la température moyenne est de 27°,5 ; sur les côtes occidentales des deux continents, elle est un peu moindre ; dans l'intérieur des terres, elle est plus élevée que sur les côtes, parce que les pluies sont moins abondantes, le ciel plus serein, et par conséquent l'influence du soleil plus énergique. En Afrique, où l'air est échauffé fortement par de vastes déserts sablonneux, cette différence est notable ; la température de l'équateur s'élève à 29° et au-delà pour des points situés à plus de 300 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Nous donnons ici la description nouvelle des lignes isothermes de M. Kaemtz, postérieure à celle de M. Berghaus, qui est de 1838, mais que l'on peut suivre néanmoins à peu près sur le tracé de la planche V.

« L'isotherme de 25° coupe la côte occidentale de « l'Amérique, un peu au nord d'Acapulco ; elle passe par « la Véra-Cruz, et un peu au nord de la Havane (tem- « pérature 25°,0). A l'est du méridien de cette ville,

« elle forme une légère convexité vers le nord, et s'a-
« baisse sur la côte occidentale de l'Afrique, qu'elle
« coupe entre le cap Blanc et l'embouchure du Sénégal,
« vers 18° et 19° de lat. N. De là elle s'élève brusque-
« ment vers le nord, passe par le nord de la mer Rouge,
« puis par Abuschcher, sur le golfe Persique (lat., 28°
« 15'; temp., 25°,0), et atteint probablement ici son
« point le plus septentrionnal. Plus à l'est, elle descend
« vers le sud, coupe le groupe des Philippines dans la
« partie boréale de l'île de Luçon par 16° à 17° de lat.
« N. (Manille, lat., 14° 36'; temp., 25°,6).

« L'isotherme de 20° coupe la côte O. de l'Améri-
« que, au milieu de la Californie, par 28° et 29° de
« lat. N. Elle s'élève un peu vers le nord; puis elle mar-
« che parallèlement à l'équateur, jusqu'à ce qu'elle at-
« teigne la côte orientale d'Amérique, dans la Caroline
« du Sud, par 32° de lat. N. (Fort-Johnston, lat., 34° 0',
« temp., 19°,2; cantonnement Jésup, lat., 31° 30', temp.,
« 20°,2). Elle s'abaisse un peu vers le sud, laisse les
« Bermudes (lat., 32° 20'; temp., 19°,7) au nord, et
« passe entre Madère et Ténériffe (Funchal, temp., 18°,7;
« Sainte-Croix de Ténériffe, 21°,9). En Afrique, elle
« monte brusquement vers le nord, passe près de Tunis
« et d'Alger; là elle semble suivre la direction de la
« côte, qui court du nord au sud, et passe entre l'île de
« Candie (lat., 35° 29'; temp., 17°,9) et le Caire (lat.,
« 30°,2; temp., 22°,4). Il est probable que dans l'inté-
« rieur de l'Asie elle s'élève de nouveau vers le nord
« pour s'abaisser ensuite vers la côte orientale, qu'elle
« coupe dans le voisinage de Formose.

« L'isotherme de 15° coupe la côte O. de l'Amérique,
« près du fort de San-Francisco, dans la Nouvelle-Ca-
« lifornie; elle marche droit à l'est, et atteint, dans
« l'état de Delaware, une latitude de 37° à 38° (Fort-
« Savern, lat., 38° 54', temp., 13°,9; Chapel-Hill, lat.,
« 35° 54', temp., 15°,7; Nashville, lat., 36° 5', temp.,
« 15°,4). De là elle s'élève vers le nord et atteint la
« côte O. de l'Europe, à la limite de l'Espagne et du

« Portugal (Lisbonne, lat., 38° 43′, temp., 16°,4); puis « elle passe au nord de Rome (temp., 15°,4) et traverse « la partie septentrionale de la Turquie. Cette ligne at- « teint la côte orientale de l'Asie, dans la partie méri- « dionale de la Corée et du Japon (Nangasaki, lat., 32° « 45′, temp., 16°,0).

« L'isotherme de 10° coupe la côte occidentale de « l'Amérique à l'embouchure de la Colombie (Fort-Geor- « ges, lat., 46° 18′, temp., 10°,1; Fort-Vancouver, lat., « 45° 36′ N., temp., 11°,5), s'abaisse vers le sud, tra- « verse la partie septentrionale de l'État d'Ohio, et at- « teint près de New-York (lat., 41° 55′, temp., 10°,0; « North-Salone, lat. 41° 20′, temp., 8°,9).Ici l'isotherme « de 10° présente une grande convexité vers l'équateur; « puis elle s'élève brusquement vers le nord, passe dans « le voisinage de Londres (lat., 51° 31′, temp., 10°,4); « Dublin (lat., 53° 21′, temp., 9°,5). C'est la plus haute « latitude que cette isotherme atteigne; car elle s'abaisse « ensuite vers le sud, passe par la Bohême (Prague, lat., « 50° 51′, hauteur au-dessus de la mer, 195 mètres, « temp., 9°,5); Dresde (lat. 51°3′, hauteur, 117 mètres, « temp., 8°,5); la partie septentrionale de la mer Noire « (Nicolaïeff, lat., 46° 58′, temp., 9°,3; Sébastopol, lat., « 44° 35′, temp., 11°,5). Cette isotherme coupe pro- « bablement la côte E. de l'Asie au nord de l'île Nipon.

« L'isotherme de 5° coupe la côte occidentale d'Amé- « rique au nord de la Nouvelle-Archangel, sur l'île Fit- « cha (lat., 57°, temp., 7°,1). Toutefois, elle semble venir « du sud; car Boulouk, sur l'île Ounalaschka, et par la « latitude de 53° 53′, paraît n'avoir qu'une température « de 4°. Elle descend ensuite vers le sud, coupe le lac « Michigan (Fort-Brady, lat., 46° 39′; hauteur, 180^{m}, « temp., 4°,9), et la côte O. de l'Amérique, dans l'État du « Maine (Eastport, lat., 44° 54′, temp., 5°,4; Halifax, « lat., 45° 44′, temp., 6°,2). Elle traverse ensuite la par- « tie méridionale de Terre-Neuve, passe au nord des « Feroë, coupe la côte norwégienne à la hauteur de « Drontheim (lat., 63° 26′, temp., 4°,5). Dès qu'elle a

« traversé les Alpes scandinaves, elle s'abaisse vers le « sud, passe au nord de Christiania (temp., 5°,4) et de « Stockholm (temp., 5°,6), au sud de Kasan et de Mos- « cou, et atteint la côte d'Asie au milieu de la chaîne des « Kouriles.

« L'isotherme de zéro, en partant de la côte O. de « l'Amérique, se dirige vers le sud, passe par la partie « méridionale du lac de Winipeg, et coupe l'angle S.-E. « du Labrador. De là elle s'élève brusquement vers le « N.-E., touche le cap Nord de la Norwége (cap Nord, « lat., 71° 10′, temp., 0°,1), descend brusquement vers « le sud dans l'intérieur de la Laponie, parallèlement à « la chaîne scandinave, traverse l'extrémité septentrio- « nale du golfe de Bothnie (Uleaborg, lat., 65°,0, « temp., 0°,7), passe au nord de Kasan, Slatoust (lat., « 55°,8, hauteur, 360^{m}, temp., 0°,7), et Bernaul (lat., « 53° 20′, hauteur, 118^{m}, temp., 1°,7), s'élève sur la « côte orientale de l'Asie, vers le N.-E., et la coupe vers « le 56e parallèle au milieu du Kamtschatka (Pétro- « paulavsk, lat., 53°, temp., 2°,04).

« Les isothermes précédentes auraient pu être tracées « sur une carte, suivant la projection de Mercator, tan- « dis que celles qui suivent ne peuvent être suivies dans « tout leur cours que sur une sphère terrestre ou sur « une carte de projection polaire, puisqu'elles ne font « plus le tour de la terre, et forment dans chaque con- « tinent deux systèmes de courbes concentriques.

« L'isotherme de — 5° commence probablement vers « l'embouchure du fleuve Mackensie, pénètre dans l'in- « térieur du continent d'Amérique, et atteint vers 92° « de long. O. et 52° de latitude N. son point le plus mé- « ridional. Se dirigeant ensuite vers le N.-E., elle passe « par les parties septentrionales du Labrador (Nain, « lat., 57°30′, temp., — 3°,6; Okak, lat., 57° 0, temp., « — 3°,6), et coupe la côte occidentale du Groënland à « la hauteur du cercle polaire. Dans notre continent, cette « ligne se trouve entre la mer Blanche et la Nouvelle- « Zemble; elle passe à plusieurs degrés au nord de To-

« bolsk, atteint sous le méridien d'Irkotzk son point le « plus méridional, puis s'élève de nouveau vers le N.-E., « et traverse la côte orientale de l'Asie, dans le pays des « Jakoutes.

« L'isotherme de — 10° coupe la partie septentrionale « du lac de l'Ours; puis elle passe dans le voisinage du « Fort-Reliance (lat., 62° 46', temp., — 10°,2), et s'élève « ensuite de nouveau vers le nord. La courbe du vieux « continent traverse la Nouvelle-Zemble (Felsenbai, lat., « 70° 37', temp., 9°,4; Matotschkin-Schar, lat., 73° 15', « temp., — 8°,4), passe dans le voisinage de Jakouzk (lat., « 62°,2, haut., 115^{m}, temp., — 9°,7); puis, s'élevant vers « le N.-E., elle atteint Nischni-Kolymsk (lat., 68° 18', « temp., — 10°,0).

« L'isotherme de — 15° passe au sud de l'île de Melville « par le Port-Élisabeth, dans l'île de Boothia (lat., 65° « 59', temp., — 15°,7), puis s'élève au nord de l'île Igloo- « lik (lat., 69° 20', temp., — 16°,6), la côte septentrionale « de la Sibérie. Cette ligne paraît couper la côte à plu- « sieurs degrés à l'ouest du cap Taimura : elle passe « peut-être aussi par Ustjansk. »

Il n'a été question dans ce qui précède que des lignes isothermes situées au nord de l'équateur; quant à celles qui sont au sud, et dont M. Berghaus a fait le tracé, comme on peut le voir planche V, elles inspirent peu de confiance à cause du manque d'observations. Nous ferons remarquer toutefois que, dans l'hémisphère austral, où il existe moins de terres que dans l'autre hémisphère, les causes locales exercent nécessairement moins d'influence sur la température moyenne; aussi les lignes isothermes diffèrent-elles moins des parallèles terrestres.

§ III. — *Des causes qui influent sur la température moyenne. — Température des pôles.*

La température d'un lieu dépend d'une foule de causes que l'on peut diviser, comme l'a fait M. de Humboldt, en causes générales et en causes particulières.

Les causes générales sont : la latitude du lieu; son éléva-

tion au-dessus du niveau de la mer; la position relative, à latitude égale, des continents et des mers, qui n'ont pas les mêmes pouvoirs absorbant, émissif et réflecteur.

Les causes particulières peuvent être partagées elles-mêmes en causes terrestres, atmosphériques et maritimes. Parmi les causes terrestres, nous citerons : l'inégalité des terrains; la direction des chaînes de montagnes; l'état de la surface terrestre, selon qu'elle est dénudée ou couverte de végétation; la forme et la masse des terres; leur prolongement vers les pôles; la quantité de neige qui les couvre en hiver; enfin, les changements résultant de la culture.

Les causes atmosphériques sont relatives à l'humidité de l'air; aux variations barométriques; à la tranquillité ou à l'agitation de l'atmosphère et à sa pureté, etc.

Les causes maritimes, dans les régions tempérées, sont relatives à la configuration des côtes, à l'est ou à l'ouest des continents; à la présence plus ou moins prolongée des glaces polaires; aux courants marins dirigés des basses vers les hautes latitudes, ou réciproquement. Toutes ces causes tendent à élever ou à abaisser la température moyenne. Parmi celles qui élèvent dans nos climats cette température, on distingue particulièrement l'absence de glaces polaires; les chaînes de montagnes abritant ou garantissant des vents froids; la rareté des marais, le déboisement d'un sol aride et sablonneux; la proximité d'un courant marin ayant une température plus élevée que celle des mers environnantes.

Parmi les causes qui abaissent la température moyenne d'un lieu, on peut citer l'élévation de ce lieu au-dessus du niveau de la mer avec l'absence de plateaux étendus; la proximité d'une côte orientale dans les latitudes hautes et moyennes; la configuration sans sinuosités sensibles d'un continent vers les pôles jusqu'aux glaces perpétuelles; les chaînes de montagnes mettant obstacle à l'arrivée des vents chauds; le voisinage de pics élevés le long des pentes desquelles il se produit des courants descendants d'air froid pendant la nuit; de vastes forêts;

de nombreux marais; un ciel brumeux qui s'oppose à la radiation solaire; un ciel serein hivernal favorisant singulièrement le rayonnement terrestre.

Le soleil agissant d'autant plus obliquement sur une contrée que sa latitude est plus élevée, la température moyenne, pour une même élévation au-dessus du niveau de la mer, toutes choses égales d'ailleurs, doit donc décroître de l'équateur au pôle. Ce décroissement suit une loi très-complexe, en raison des causes nombreuses qui interviennent pour le modifier.

Sous les tropiques, où la hauteur du soleil est toujours considérable dans le cours de l'année, la différence de latitude a beaucoup moins d'influence que dans les régions tempérées; du reste, les courants marins et aériens qui règnent constamment contribuent encore à égaliser les climats.

Dans les latitudes moyennes il n'en est plus de même. Il est bien difficile de suivre le décroissement progressif de la température de l'équateur au pôle, par la difficulté de se mettre en garde contre l'influence des causes secondaires perturbatrices; cependant on a déjà recueilli quelques données qui laissent entrevoir la marche qu'il suit sous certaines latitudes. Ce décroissement paraît être le plus rapide, comme le fait remarquer M. de Humboldt (*Asie centrale*, t. III, p. 190), dans les deux continents entre les parallèles de 40 et 45° : « Dans le système des « climats de l'Europe occidentale, la température « moyenne qui correspond à cette latitude est de 13° à « 13°,8, et le mois le plus froid y atteint encore 3 et « 4° de température moyenne; c'est la belle et fertile « zone qui traverse le midi de la France, entre Valence « et Avignon, et l'Italie entre Lucques et Milan; c'est « la zone dans laquelle la région des vignes touche à celle « des oliviers et des citronniers. Nulle part ailleurs, en « avançant du nord au sud, on ne voit accroître plus « sensiblement la température; nulle part les productions « végétales et les objets variés de l'agriculture ne se suc« cèdent avec plus de rapidité. »

D'un autre côté, si l'on consulte le système des lignes isothermes d'Europe, on trouve, comme M. de Humboldt l'a observé, que pour 1° de latitude, il existe une différence de température moyenne de l'année,

De Berlin	à Rome égale à . . .	0°,59
—	à Palerme.	0°,56
De Copenhague	à Rome	0°,52
De Paris	à Rome	0°,66
—	à Marseille.	0°,59
Du Cap Nord	à Paris	0°,48
—	à Berlin	0°,53
—	à Palerme.	0°,52

La moyenne étant d'un demi-degré, il s'ensuit qu'en Europe, de 38° à 71° de latitude, le décroissement de la température moyenne est d'un demi-degré pour 1° de latitude.

Depuis le 71° de latitude jusqu'au pôle, dont on ne connaît point la température, on n'a pas encore la loi du décroissement de la température avec la latitude. Ce qui jette de l'incertitude sur l'évaluation de la température polaire, c'est l'ignorance où l'on est de savoir si les terres s'étendent jusqu'au pôle nord, ou s'il est environné d'eau. Dans le premier cas, M. Arago évalue la température du pôle à — 32°; dans le second, à — 18°. Meyer ne lui accorde qu'une température égale à zéro, valeur qu'on ne saurait admettre.

Les derniers voyages aux régions polaires portent à croire que le pôle arctique est au milieu de la mer; et comme la plus basse température moyenne obtenue dans les observations faites sur la côte occidentale de l'Amérique, sur la côte orientale de l'Asie, et sur la côte ouest de l'Europe, ne dépasse pas — 8°, on est porté à croire que le pôle nord a une température peu différente.

Quant au pôle austral, on n'a aucune donnée positive sur sa température.

En jetant les yeux sur la carte (pl. V), on voit sur-le-champ que les pôles de la terre ne sont pas les points

du globe où la température est la plus basse, puisque ces points, qu'on a appelés pôles de froid, sont les centres de figures des courbes isothermes fermées qui sont les plus rapprochées des pôles terrestres.

M. Brewster assigne aux deux pôles de froid du nord, dans les deux continents, les positions suivantes :

1er pôle.	Long. E.. de Paris...	93°
	Lat..N............	80°
2e pôle.	Long. O. de Paris ...	102°
	Lat..N............	80°

M. Kaemtz place un des pôles au nord du détroit de Barrow en Amérique, et l'autre près du cap de Taimura en Sibérie.

M. Berghaus (*voy. planche* V) place le pôle de froid américain vers 92° de longitude ouest, 78° de latitude nord, et lui assigne pour température — 19°, 7; le pôle de froid asiatique, vers 118° longitude est, 79° 30′ de latitude nord, et lui donne pour température — 17°,2.

Ces déterminations ne doivent être considérées toutefois que comme des valeurs approximatives, vu la difficulté de déterminer la position exacte de ces points.

Au delà de l'équateur, dans l'hémisphère austral, il existe encore peu d'observations de température moyenne. Nous donnons ci-après quelques moyennes pouvant servir de points de repères. (*Kaemtz*, p. 200.)

Lieux.	Latitude sud.	Température.
Marahan.......	2° 29.........	27° 40
Rio-Janeiro.....	22° 56.........	23° 42
Buenos-Ayres...	34° 36.........	17° 00
Ile Falkland....	51° 00.........	8° 46
Fort-Famine....	53° 44........	5° 04

Ces résultats indiquent que l'isotherme de 5° coupe l'extrémité méridionale de l'Amérique vers la latitude de 55°; or, comme cette même ligne isotherme, sur l'autre hémisphère, coupe la partie occidentale de l'Amérique à peu près sous une latitude semblable, il s'ensuivrait que, dans ces deux régions du globe, la

distribution de la chaleur serait sensiblement la même jusqu'à l'isotherme de 5°; il faudrait d'autres observations pour appuyer cette conclusion. Au delà de cette latitude, dans les deux hémisphères, on pense que la distribution de la chaleur est moins symétrique, et que l'océan austral, à latitude égale, a une température inférieure à celle de l'océan boréal; dès lors, le pôle austral aurait une température plus basse que celle du pôle boréal. Nous ferons remarquer que les navigateurs ne sont pas d'accord sur ce point. En effet, Cook, arrêté par les glaces, ne put aller au delà du cercle polaire. Weddel, plus tard, trouva la mer libre jusqu'au 74° de la latitude; Dumont-d'Urville, dans ses deux voyages, ne put franchir également le cercle polaire; tandis qu'après lui, James Ross atteignit le 78° 4' de latitude. De là, on a dû conclure que, dans les mers polaires australes, il existe des bancs énormes de glace n'occupant pas tous les ans la même place, et qui présentent des solutions de continuité, entre lesquelles des navigateurs ont pu s'avancer.

Il peut se faire que ces bancs de glace flottants, qui ont arrêté quelques voyageurs, ayent contribué à leur faire exagérer la température inférieure des régions polaires australes. Quoi qu'il en soit, on s'est demandé d'où pouvait provenir cette différence de température entre les deux hémisphères. Diverses opinions ont été émises à cet égard. Les uns l'ont attribuée à la grande masse d'eau qui se trouve dans l'hémisphère sud, laquelle réfléchit à sa surface une plus grande quantité de rayons calorifiques que les terres; d'autres, à la configuration particulière des terres australes qui influent sur les courants marins; on ne sait rien de positif à cet égard.

§ IV. — *Températures extrêmes observées dans divers lieux.*

Il est utile, pour l'étude de la géographie des animaux et des végétaux, et de leur distribution sur le globe, de connaître les températures minima et maxima

des principales régions, puisqu'il est des degrés que l'homme, les animaux et les plantes ne pourraient supporter sans qu'il y ait danger pour la vie.

MINIMA DE TEMPÉRATURE OBSERVÉS EN DIVERS LIEUX.

Lieux.	Latitude.	Température minima.
Le Caire	30° 2′ N	+ 9°,1
Charlestown	32 40	— 17,8
Cap de Bonne-Espérance	33 55 S	+ 5,6
Washington	38 53 N	— 26,6
Rome	41 54	— 5,9
Cambridge (Massachus.)	42 25	— 24,4
Padoue	43 18	— 15,6
Montpellier	43 36	— 16,1
Nice	43 42	— 9,6
Baugos (États-Unis)	45 0	— 40,0
Turin	45 4	— 17,8
Milan	45 28	— 15,0
Montréal	45 30	— 37,2
Paris	48 50	— 23,1
Londres	51 31	— 11,4
Cumberland-House	54 0	— 42,2
Copenhague	55 41	— 17,8
Moscou	55 45	— 38,8
Stockholm	59 20	— 26,9
Pétersbourg	59 56	— 34,0
Fort-Entreprise	64 30	— 49,7
Fort-Reliance	62 46	— 56,7
Bosekop (Laponie)	69 58	— 23,5
Port-Élisabeth	69 59	— 50,8

MAXIMA DE TEMPÉRATUTE OBSERVÉS EN DIVERS LIEUX.

Lieux.	Latitude.	Température maxima.
Surinam	5° 38′ N	32°,3
La Martinique	14 35	35,0
Philæ (Égypte)	24 0	43,1
Esné (Égypte)	25 15	47,4
Le Caire	30 2	40,2
Bassora (Mésopotamie)	30 45	45,3
Palerme	38 8	39,7
Naples	40 52	38,7
Rome	41 54	38,0
Padoue	43 18	36,3
Turin	45 4	36,9

Lieux.	Latitude.	Température maxima.
Milan	45°28′	34°,4
Paris	48 50	38,4
Prague	50 50	35,4
Copenhague	55 41	33,7
Moscou	55 45	32,0
Nain (Labrador)	57 0	27,8
Stockholm	59 20	34,4
Pétersbourg	59 56	33,4
Eyafiord (Islande)	66 30	20,9
Ile Melville	74 45	15,6
Port-Élisabeth	69 59	16,7
Amérique du Nord	65 30	20,0

On voit, dans ces tableaux, la preuve du fait énoncé en parlant des lignes isochimènes et isothères, savoir, qu'en cheminant, en Europe, des côtes occidentales vers l'orient, les lignes isochimènes s'abaissent vers le sud, tandis que les lignes isothères se relèvent vers le nord. Nous citerons pour exemples Paris et Moscou, situés sous les 48° 50′ et 55° 45′ de latitude, qui ne présentent qu'une différence de 6°,4 dans leur température maximum, tandis que cette différence est de — 15°,7 pour leur température minimum. Les observations consignées dans ces tableaux montrent encore que la plus haute température observée est celle d'Esné, + 47°,4, et la plus basse — 56°,7, que le capitaine Back a supportée dans l'Amérique du Nord, en essayant de rejoindre le capitaine Ross. La différence entre ces deux températures étant 104°, il s'ensuit que l'homme peut vivre dans des atmosphères qui présentent une différence plus forte que celle qui existe entre la température de la glace fondante et celle de l'eau bouillante.

Nous ajouterons encore quelques observations qui ne sont pas sans intérêt. Entre les tropiques, la température du sol monte quelquefois à 52°,5. M. de Humboldt, près des cataractes de l'Orénoque, a trouvé un sable granitique blanc, à gros grains, couvert d'une belle végétation de graminées, qui avait une température de 63°,2, tandis que celle de l'air n'était que de 29°,6.

On a vu, en Égypte, la température du sol monter à 67°,5.

§ V. — *Diminution de la température avec la hauteur dans l'atmosphère.*

La densité de l'air devenant moindre à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol, la quantité de chaleur rayonnante absorbée doit diminuer dans les mêmes rapports. D'un autre côté, la terre échauffant davantage les couches d'air en contact avec elle, que celles qui en sont plus éloignées, il en résulte que la température de l'air, toutes choses égales d'ailleurs, doit s'abaisser avec la hauteur, et que très-probablement la température des dernières couches de l'atmosphère diffère peu de celle des espaces planétaires.

L'abaissement de température jusqu'à une certaine hauteur n'est pas proportionnel à la différence du niveau, vu les nombreuses causes perturbatrices qui exercent une influence. Cependant on admet approximativement cette loi, qui se vérifie pour de faibles différences d'élévation. Si l'on divise alors la différence de hauteur de deux masses d'air par les différences de température correspondantes, on a la hauteur dont il faut s'élever pour avoir un abaissement de température égal à 1°. Cette hauteur, comme il est facile de le concevoir, varie avec la saison, l'heure de la journée, le vent régnant, etc., et avec toutes les causes qui amènent un mélange dans les masses atmosphériques. Les observations simultanées consignées dans le tableau suivant, faites pendant dix-sept jours au col du Géant par de Saussure, à 3428 mètres au-dessus du niveau de la mer, et sur le Rigi, à 1810 mètres, en sont une preuve manifeste. Dans ce tableau, la différence de niveau correspond à un abaissement de température de 1° thermométrique.

HEURES.	COL DU GÉANT.	RIGI.	HEURES.	COL DU GÉANT.	RIGI.
	m.	m.		m.	m.
Midi.	147 93	129,81	Minuit.	170 93	163,91
Max. faible. 1 h	»	131,75	1 h	»	168,40
2	139 94	128,83	2	189 06	174,63
3	»	127,08	3	»	180,68
4	141 89	124,35	4	209 91	185,16
Min. fort. 5	»	121,81	5	»	186,33 Max. fort.
6	140 92	122,01	6	194 90	178,92
7	»	127,86	7	»	168,01
8	143 06	135,65	8	179 90	153,19
9	»	144,42	9	»	144,42
10	156 06	152,02	10	160 02	139,36
11	»	158,46	11	»	121,95 Min. faible.
			MOYENNE......	Col du Géant.	m. 164,69
				Rigi.....	149,10

Ces résultats donnent deux maxima et deux minima: un maximum fort, à cinq heures du matin; un maximum faible, à une heure après-midi; deux minima, l'un à cinq heures du soir, et l'autre à onze heures du matin. Les moyennes, dans ces deux localités, n'étant pas les mêmes, on en conclut que des causes particulières, dont il est bien difficile de se rendre compte, exercent une influence sur les températures horaires. Du reste, la variation diurne n'est pas la même sur les montagnes et dans les plaines, comme le démontrent les observations faites par M. Bravais pendant 44 jours à Milan, Genève et Zurich d'une part, et de l'autre au sommet du Faulhorn, dans le canton de Berne, à une hauteur de 2673 mètres. La moyenne des observations correspond au 12 août 1841.

Heures.	Stations inférieure.	Stations supérieure.	Différence.	Décroissem. de 1° pour
0 (midi)....	21°,45....	6°,30...	15°,15...	155m
3.........	22 ,28....	5 ,71...	16 ,57...	139
6.........	20 ,91....	4 ,09...	16 ,82...	139
9.........	17 ,85....	3 ,10...	14 ,75...	159
12 (minuit).	14 ,67....	2 ,95...	12 ,72...	200

Heures.	Stations inférieure.	Stations supérieure	Différence.	Décroissem. de 1° pour
15........	» »....	2 ,65...	» »...	200
18........	14 ,88....	2 ,53...	12 ,35...	190
21........	18 ,85....	4 ,21...	14 ,64...	160
		Moyenne.........		170^m.

On déduit de ces observations simultanées que la différence entre les températures aux deux stations, l'une supérieure, l'autre inférieure, n'est pas la même aux différentes heures de la journée, et que cette différence atteint son maximum vers midi ou deux heures, et son minimum vers six heures du matin.

Il arrive quelquefois, en raison de causes perturbatrices, que dans des localités peu éloignées le décroissement de 1° de température ne correspond pas à la même différence de niveau.

Nous venons de voir que la différence de niveau pour 1° de décroissement de température change avec l'heure de la journée; mais, en moyenne, cette différence varie à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère. Sous l'équateur, comme l'a observé M. de Humboldt, cette diminution ne suit pas une loi uniforme; il suffit pour s'en convaincre de jeter les yeux sur les résultats suivants :

Hauteur.	Température moyenne.	Différence.
0^m	27° ,5.......	» »
1000	21 ,8.......	5°,7
2000	18 ,4.......	3 ,4
3000	14 ,3.......	4 ,1
4000	7 ,0.......	7 ,3
5000	1 ,5.......	5 ,5

Le décroissement est le plus petit possible entre 1000 et 2000 mètres, à la hauteur correspondant à la région où se trouvent des vapeurs qui absorbent une grande partie du rayonnement solaire.

A 3000 mètres, la température moyenne est sensi-

blement la même que celle de Montpellier et de Madrid, tandis qu'à 4000 mètres on a encore celle de Varsovie. Ces hauteurs correspondent dans nos climats à celles des neiges éternelles, puisque les plus hautes montagnes de l'Europe ont pour hauteur :

Le Mont-Blanc........	4810 mètres.
La Jung-Frau (Suisse)...	4180
Le Col du Géant (Alpes).	3426
Le Mont-Perdu........	3410

Il n'est pas sans intérêt de donner ici les plus grandes hauteurs habitées du globe dans les régions équatoriales et les régions tempérées.

Maison de poste d'Ancomarca... (Habitée pendant quelques mois de l'année seulement.)	4712 mètres.
Tacora (village indien).........	4344
Potosi, partie la plus élevée.....	4166
Ville de Calamarca............	4141
Métairie d'Antisana...........	4101
Micuipampa (Pérou)...........	3618
Ville de Quito..............	2908

Dans nos climats.

Hospice du grand Saint-Bernard.	2491
Id. du Saint-Gothard......	2075

La température moyenne du grand Saint-Bernard est de 1°, tandis que celle de la ville de Quito, à une hauteur de 2908 mètres, est de 15°,6; cet exemple et les précédents montrent que les lieux en pays de montagnes, à des élévations égales, ne possèdent pas toujours à beaucoup près la même température moyenne, puisque cette température dépend non-seulement de la latitude, mais encore, comme on le verra plus loin, du voisinage de plateaux échauffés par le soleil, de la nature du sol, de la culture, de l'humidité, de l'accumulation des nuages, etc.

8.

M. de Humboldt, en discutant les nombreuses observations faites dans la zone équinoxiale, a trouvé, de 0m à 4000 mètres de hauteur, un abaissement de température de 1° par 187 à 190 mètres. Dans la zone tempérée, de 0m à 2900 mètres, il est de 1° par 150 à 170 mètres.

Au Spitzberg (lat., 77° 30′), les membres de la commission scientifique ont reconnu, dans une série de quatre jours d'observations, faites de demi-heure en demiheure, qu'il est de 1° par 172 mètres, résultat qui coïncide avec le précédent.

Voici encore quelques autres déterminations :

Dans l'Inde méridionale, on a trouvé	1°	par	177m,0
Dans le nord de l'Indoustan......	1	par	226 ,6
Dans la Sibérie occidentale.......	1	par	247 ,0
Aux États-Unis................	1	par	222 ,2

Sous l'équateur, la loi de décroissement est à peu près la même en toute saison, tandis que, dans les régions polaires, elle présente de grandes différences en hiver et en été.

A toutes ces divergences dans les résultats, se joignent encore quelquefois des inversions dans la marche du décroissement de la température. Nous citerons comme exemple les observations faites par MM. les capitaines Sabine et Foster en juillet 1823, en cherchant à déterminer la hauteur d'une montagne isolée et terminée en pointe du Spitzberg. (*Annuaire du bureau des longitudes pour* 1839, p. 412.)

Le 17 juillet, entre 4 h. 30 min. et 6 h. du soir, la température moyenne de l'air était :

A la station inférieure.......... + 1°,6 centigr.

Au sommet de la montagne, à 501 mètres de hauteur............... + 1°,9

Le temps était sombre ; il faisait un peu de vent.

Le 18 juillet, entre 3 h. 20′ et 6 h. la temp. était :

A la station inférieure.......... + 1°,9

Au sommet de la montagne..... + 1°,2

Brouillard épais ; brise modérée.

Le 20 juillet, entre minuit et 2 h. du matin (à cette époque, le soleil ne se couche pas au Spitzberg ; l'élévation du soleil était d'environ 11°) :

A la station inférieure la temp. était. + 2°,4

Au sommet de la montagne..... + 4°,4

Le temps était très-beau, très-serein.

Le 21 juillet, entre 10 h. et demie du matin et midi et demi le thermomètre donnait :

A la station inférieure.......... + 4°,3

Au sommet de la montagne .... + 3°,9

Il pleuvait à la station inférieure. La montagne était dans les nuages.

L'anomalie augmente donc d'autant plus que le temps est moins couvert; elle atteint le maximum lorsque le ciel est serein. Pour s'en rendre compte, il suffit d'invoquer les lois du rayonnement de la chaleur. En effet, pendant la nuit, lorsque le ciel est serein, les corps placés à la surface de la terre se refroidissent, par voie de rayonnement, plus que la couche d'air qui les environne, laquelle cependant finit par se mettre en équilibre avec eux; il doit donc arriver un instant où les couches supérieures sont plus chaudes que celles qui se sont refroidies par voie de contact. Inférons donc de là que, dans nos climats, la nuit, toutes les fois que le ciel est suffisamment serein, la température des couches d'air doit aller en croissant jusqu'à une certaine hauteur; c'est ce que Wels et d'autres météorologistes ont observé.

Les observations thermométriques faites dans les ascensions aérostatiques sont celles qui inspirent le plus de confiance, pour la détermination du décroissement de la température avec la hauteur, puisqu'elles sont dégagées des effets provenant de l'échauffement du sol et de l'influence des plateaux.

M. Bravais a réuni dans le tableau ci-joint les observations faites dans plusieurs ascensions aérostatiques.

OBSERVATEURS.	LIMITES de la COUCHE D'AIR.	DÉCROISSEMENT DE 1° POUR :
Gay-Lussac............	de 0m à 3800m	188m,5
	3800 — 5700	185 ,8
	5700 — 6900	161 ,2
Zeun et Jungins.........	0m — 3900	189m,0
Graham et Beaufoy........	0m — 3800	185m,0
Sacharoff...............	0m — 2600	224m,0
Clayton (deuxième voyage).	0m — 2800	135m,0
	2800 — 4800	291 ,0
	4800 — 5450	255 ,0

Ces observations sont en trop petit nombre pour que l'on puisse en tirer des conséquences générales.

Dans les régions polaires, le décroissement ne se fait sentir qu'à une certaine hauteur qui n'a pas encore été déterminée. En effet, à Ingloolick, par 69° 21′ de latitude boréale, le capitaine Parry a enlevé un cerf-volant à 130 mètres de hauteur, avec un thermomètre à minima. La température de l'air à cette hauteur était de 31° au-dessous de zéro, comme sur les glaces de la mer.

Toutes les données précédentes sont à prendre en considération dans la réduction des températures moyennes des lieux élevés au niveau de la mer.

Quant à la diminution de la température pour des hauteurs supérieures à celles où l'homme est parvenu, si la loi reconnue par M. Biot dans les régions inférieures se continue au-delà, cette diminution doit suivre la variation de la densité correspondante de l'air; mais nous ne traiterons cette question qu'en parlant de l'atmosphère. Nous ne sommes entré dans ces détails touchant la diminution de température avec la hauteur que pour montrer l'influence du sol et des courants d'air, et faire concevoir comment peuvent exister, même sous les tropiques, des neiges perpétuelles.

§ VI. *De la limite des neiges perpétuelles.*

Lorsqu'on gravit une montagne élevée, quelle que soit sa latitude, on arrive à des neiges perpétuelles. A cette hauteur, la température moyenne de l'année n'est point celle de la glace fondante, comme l'ont prouvé MM. de Humboldt et de Buch. En général, la limite inférieure est celle où il tombe de la neige en été; phénomène qui n'a lieu ordinairement, à la surface du sol, que lorsque la température de l'air est seulement à quelques degrés au-dessus ou au-dessous de zéro; c'est donc la hauteur à laquelle la neige tombée pendant l'hiver ne fond pas lors des grandes chaleurs de l'été.

Dans le tableau de la page suivante (de Humboldt, *Asie centrale*, t. III, p. 359), se trouvent un grand nombre d'observations relatives à la limite inférieure des neiges perpétuelles en Europe, en Asie et en Amérique.

Les résultats consignés dans ce tableau montrent que la limite des neiges perpétuelles s'abaisse de l'équateur au pôle; toutefois cette règle, suivant M. de Humboldt, éprouve de nombreuses exceptions, dues aux causes suivantes; savoir : la variation de température dans les diverses saisons; la sécheresse de l'air; l'épaisseur de la masse des neiges; le rapport de la limite des neiges à la hauteur totale de la montagne; la proximité de cimes voisines couvertes de neige; la rapidité des pentes; l'étendue, la position, la hauteur des plaines qui entourent les montagnes; le rayonnement de ces mêmes plaines selon qu'elles sont couvertes de gazon ou de forêts; la direction des vents régnants et leur contact avec la mer, etc.

DE LA LIMITE DES NEIGES PERPÉTUELLES DANS LES DEUX HÉMISPHÈRES

fondé sur des mesures directes *(thermomètre centigrade)*.

CHAINES DE MONTAGNES.	LATITUDES.	LIMITE INFÉRIEURE des neiges perpétuelles	TEMPÉRATURES MOYENNES au niveau de l'Océan par les mêmes latitudes. ANNÉE entière.	ÉTÉ seul.
		Mètres.		
I. *Hémisphère boréal.* Norwége, littoral, île Mageroe.	71 1/4 N.	720	0°,2	6°,4
Norwége intérieure..........	70°—70° 1/4 N.	1072	— 3°,0	11°,2
Norwége intérieure..........	67°—67° 1/2 N.	1266	......	......
Islande, Osterjockull........	65° N.	936	4°,5	12°,0
Norwége intérieure..........	60°—62° N.	1560	4°,2	16°,3
Chaîne d'Aldan (Sibérie).....	60° 55′ N.	1364	......	......
Oural septentrional, douteux, selon M. Strajefsky.......	59° 40′ N.	1460	3°,5	15°,7
Kamtchatka, volcan de Chevelutch..................	56° 40′ N.	1600	2°,0	12°,6
Ounalachka..................	53° 44′ N.	1070	4°,1	10°,5
Altaï......................	49° 1/4—51° N.	2144	7°,3	16°,8
Alpes......................	45° 3/4—46° N.	2708	11°,2	18°,4
Caucase, Elbrouz...........	43° 21′ N.	3372	13°,8	21°,6
Caucase, Kasbek............	42° 42′ N.	3235	......	......
Pyrénées...................	42° 1/2—43° N.	2728	15°,7	24°,0
Ararat.....................	39° 42′ N.	4318?	17°,4	25°,6
Mont Argœus (Asie Mineure)...	38° 33′ N.	3262	......	......
Bolor......................	37° 1/2 N.	5185	......	......
Sicile, Etna................	37° 1/2 N.	2905	18°,8	25°,1
Espagne (Sierra Nevada de Grenade)..................	37° 10′ N.	3410	......	......
Hindou-Kho.................	34° 1/2 N.	3956	......	......
Himalaya (pente septentrionale)	30° 3/4 31°—N.	5067	......	......
» (pente méridionale)...	....	3956	20°,2	25°,7
Mexique....................	19°—19° 1/4 N.	4500	25°,0	27°,8
Abyssinie..................	13° 10′ N.	4287	......	......
Amérique méridionale (Sierra Nevada de Merida).........	8° 5′ N.	4550	27°,2	28°,3
Amérique méridionale (Volcan de Tolima)...............	4° 46′ N.	4670	......	......
Amérique méridionale (Volcan de Puracé)...............	2° 18′ N.	4688	......	......
II. *Équateur* (Quito)........	0° 0′.	4824	27°,7	28°,6
III. *Hémisphère austral* (Andes de Quito)............	0°— 1° 1/2 S.	4814	......	......
Chili :	14° 1/2 18°—S.			
Cordillère orientale..........	....	4853	......	......
» occidentale........	....	5646	......	......
Chili, Portillo et volcan de Peuquenès...............	33° S.	4483	......	......
Chili, Andes du littoral......	41°—44° S.	1832	......	
Détroit de Magellan..........	53°—54° S.	1130	5°,4	10°,0

On déduit en outre ces conséquences :

Depuis l'équateur jusqu'à 8° de latitude, la limite des neiges perpétuelles se trouve à la hauteur de. 4816 m.

Dans la zone torride, de 16 à 19° de latitude N. 4507

Dans la zone torride, de 16 à 19° de latitude S., la limite pour la Cordillère orientale du haut Pérou est de. 4853

La limite, pour la Cordillère occidentale. 5646

M. de Humboldt a fait les observations suivantes relativement à cette différence entre la hauteur des neiges sur les deux revers des Cordillères.

« Dans les deux Cordillères (orientale et occidentale) du haut Pérou, sur des revers opposés, le décroissement de la chaleur est modifié, comme à la pente tibétaine de l'Himalaya, par le rayonnement et par l'influence d'un grand plateau (celui de Titicaca a 1986 toises de hauteur). Dans les montagnes du Mexique, entre les 18° et 19° de latitude, toute végétation (phanérogame) disparaît à 2000 ou 2200 toises de hauteur. Quant au Pérou, sur le prolongement de la même chaîne, non-seulement il existe une nombreuse population agricole à des hauteurs supérieures, mais on y trouve encore des villages et des cités. Le pavé de la haute ville de Potosi a 2137 toises ou 4166 mètres d'élévation absolue. Aujourd'hui un tiers de la population des contrées montueuses du haut Pérou habite des régions situées fort au-dessus de celle où toute culture et toute végétation ont cessé, à parité de latitude, dans l'hémisphère boréal. »

Dans la Cordillère orientale, composée de schistes et de roches arénacées, de syénite et de porphyre, les neiges descendent bien plus bas que dans la Cordillère occidentale, qui est toute volcanique et trachytique.

Nous répétons encore que, pour se rendre compte de la hauteur des neiges perpétuelles dans une contrée quelconque, il ne faut jamais perdre de vue que cette hauteur, dans le cours de plusieurs années, dépend de la

température des plaines ou des plateaux au-dessus desquels les neiges s'élèvent, du degré de chaleur et de la durée des étés, de la quantité de neige tombée en hiver, de la direction des vents, de la position plus ou moins continentale de la contrée, de l'étendue et de la hauteur des plateaux adossés, de la sécheresse de l'atmosphère, de sa diaphanéité, de l'escarpement des sommets et de la masse des neiges voisines.

On conçoit que la hauteur des neiges perpétuelles soit dépendante de la quantité de neige tombée pendant l'hiver et de la chaleur estivale, puisque, d'une part, la neige ne peut se fondre qu'aux dépens de la chaleur solaire, et que, de l'autre, cette chaleur ne peut fondre qu'une quantité donnée de neige; à latitude égale, cette hauteur doit donc être plus élevée dans l'intérieur des continents, où il tombe moins de neige et où les étés sont plus chauds que sur les côtes.

§ VII. *Des glaciers.*

La limite des neiges perpétuelles, avons-nous dit, s'abaisse de l'équateur aux pôles; mais dans un même pays comme les Andes, les Alpes, par exemple, cette ligne est sinueuse, et l'on voit des espèces de rameaux de glace, qui tiennent aux cimes neigeuses de montagnes, et s'avancent plus ou moins dans les vallées transversales, bien au-dessous de la limite des neiges perpétuelles, et quelquefois jusque près des habitations; ces espèces de rameaux sont des glaciers.

Lorsque la neige tombe sur les sommets des montagnes, et qu'elle est chassée par les vents, elle s'accumule dans les dépressions qui avoisinent les cimes les plus élevées, et que l'on a nommées des cirques; alors elle se tasse et forme de vastes amas appelés champs de neige. Là, ces masses de neige ne restent pas immobiles; elles éprouvent un mouvement de translation, et produisent ces glaciers ou fleuves de glace qui descendent avec une lenteur extrême dans les vallées. Ils se divisent à la manière des cours d'eau quand

ils rencontrent un obstacle, et se réunissent aussitôt que cet obstacle a disparu.

L'épaisseur d'un glacier est en rapport avec son étendue et la pente de la vallée; sa longueur et sa largeur sont très-variables. L'épaisseur du glacier de l'Aar est de 400 mètres au moins près de l'Abschwung. Le glacier des Bois, vallée de Chamonix, a un parcours de 5 lieues; sa largeur est d'une lieue à son origine, et partout ailleurs elle est très-variable. Le glacier d'Aletsch, le plus long des Alpes, a un parcours de 9 lieues.

On a remarqué qu'en général les glaciers n'existent que dans les vallées transversales, et rarement dans les grandes vallées parallèles aux chaînes de montagnes.

Entrons maintenant dans quelques détails sur la formation des glaciers. Supposons deux cimes très-élevées, séparées l'une de l'autre par une vallée dont la partie supérieure est remplie d'une masse considérable de neige; au retour de la belle saison, lorsque la hauteur du soleil augmente, cette neige fond peu à peu pendant le jour, l'eau de fusion s'infiltre entre les cristaux et entraîne avec elle de l'air. Cette eau, en se congelant pendant la nuit, forme des granules de glace transparente auxquels on a donné le nom de *névé*, les bulles d'air s'opposant à la formation d'une masse compacte. Des effets semblables se reproduisent pendant les jours et les nuits qui suivent. Lorsque la fusion de la neige est abondante, l'eau qui en résulte pénètre la masse de neige, la creuse, forme des galeries qui se remplissent d'air; ces effets ont lieu particulièrement à l'extrémité inférieure du glacier. Cet amas de glace poreuse et légère, que ne parviennent jamais à fondre complétement les chaleurs de l'été, descend dans les vallées, non-seulement en raison de la pente de celles-ci, mais encore parce que l'eau qui s'est infiltrée dans la masse forme dans les parties inférieures des canaux qui la séparent du sol; le glacier n'étant plus retenu au sol suit naturellement, en vertu de son poids, la pente de la vallée; la descente d'une masse aussi considérable ne pouvant

s'opérer uniformément, il en résulte des crevasses et des fentes. L'infiltration et la congélation devenant de plus en plus parfaites à mesure que le glacier avance, les blocs de glace acquièrent alors plus de compacité, et les parties inférieures du glacier réfléchissent ces belles teintes bleu d'azur qu'admirent les voyageurs.

On conçoit, d'après ce qui précède, que les glaciers descendent d'autant plus bas qu'ils proviennent de cirques plus vastes, car les masses de neige accumulées étant plus considérables réparent les pertes que la fusion leur fait éprouver à l'extrémité inférieure.

Toutes les fois que la fonte du glacier est assez abondante pour l'emporter sur le mouvement descendant, le glacier semble reculer au lieu d'avancer; selon que les étés sont plus ou moins chauds, l'extrémité inférieure éprouve donc une espèce d'oscillation annuelle. Il résulte de cet état de choses que, lorsqu'il avance, il renverse tous les objets qui se trouvent sur son passage; tandis que, lorsqu'il recule, il ne laisse qu'un sol aride, recouvert de débris de roches semblables à celles qui sont situées sur ses bords, roches provenant de l'éboulement des montagnes environnantes, et appelées moraines du glacier.

Le mouvement de progression des masses glacées, joint à la pression que leur poids fait éprouver aux parois latérales et au fond de la vallée, fait que les roches sur lesquelles descend lentement le glacier sont polies, usées et même striées par les fragments des roches et le sable provenant des éboulements latéraux; ces stries sont parallèles à la direction du mouvement de progression. Les roches qui se trouvent sur le passage du glacier sont usées et arrondies en amont, si elles ne sont pas entraînées; tandis qu'en aval elles conservent leurs formes anguleuses.

On ne trouve pas de glaciers sous toutes les latitudes, en raison même des conditions qui sont nécessaires pour leur formation. Sous l'équateur, il n'existe, dit-on, que des champs de neige; dans la zone tempérée, les gla-

ciers sont fréquents; dans les régions polaires, leur limite inférieure se trouve au niveau des mers. M. de Buch rapporte que, sous le 67e degré de latitude boréale, la montagne de Runnen, dont l'élévation est de plus de 1400 mètres, est dans ce cas. Ce glacier est peut-être le seul connu du continent européen, dont les glaces soient baignées par les eaux de la mer.

Pour évaluer les effets de la chaleur sur la fonte de la glace, on enfonce dans la masse des piquets qui, en se déchaussant lorsque la surface se fond, semblent être soulevés. Nous citerons comme exemple les observations faites par M. Martins, pendant l'été de 1841, à la surface du petit glacier situé au-dessous du Faulhorn; la fusion moyenne diurne a été de 37 millimètres, de sorte que, durant cette période de temps, la surface s'est abaissée à peu près d'un mètre en un mois.

Cet abaissement de la surface des glaciers donne lieu à un effet curieux : un bloc quelconque, quand il est posé sur cette surface, protége nécessairement des effets de l'irradiation solaire la partie qui est au-dessous, laquelle ne se fond pas, tandis qu'il n'en est pas de même de celles qui l'entourent; il suit de là que, la surface du glacier s'abaissant par la fusion, le bloc finit par se trouver au sommet d'un piédestal de glace dont la hauteur peut servir à donner une idée de la quantité de glace fondue.

L'humidité a une influence sensible sur la fusion des glaciers. Si l'air est sec et chaud, l'évaporation est plus marquée à la surface; s'il est froid et humide, les vapeurs, en se condensant, contribuent alors à son accroissement.

Plusieurs observateurs se sont occupés de déterminer la marche des glaciers en plaçant sur leur surface et sur les parois des vallées des points de repères; nous citerons entre autres M. Forbes, qui a fait des recherches, à ce sujet, sur la mer de glace de Chamonix, MM. Agassiz et Desor, puis M. Martins, qui ont opéré sur le glacier de l'Aar. Ces observateurs ont été conduits

aux conséquences suivantes : la pente d'un glacier ne suffit pas pour lui donner plus ou moins de vitesse ; il est nécessaire de prendre en considération sa masse totale, sa longueur, et les parois du couloir dans lequel il se meut. La surface de la partie moyenne du glacier de l'Aar avance de 71 mètres par an ; vers la base du glacier la vitesse est de 39 mètres ; vers le sommet elle est de 75 mètres. La vitesse du glacier de l'Aar est plus considérable à sa surface qu'à une certaine profondeur. En supposant en moyenne une vitesse de 60 mètres par an, un point de la surface d'un glacier avancerait d'une lieue et demie par siècle ; ainsi, en admettant cette vitesse moyenne pour le glacier des Bois, une pierre tombée à sa partie supérieure mettrait 330 ans pour parcourir ses 5 lieues d'étendue.

Les glaciers ont soulevé une question très-importante, que nous devons aborder ici, parce qu'elle se rattache à l'état calorifique du globe, à des époques anciennes qu'il est impossible de préciser. Nous voulons parler des rapports qui lient les glaciers et les blocs erratiques que l'on rencontre dans presque toutes les parties du monde. Les blocs erratiques sont des masses de roches, d'énormes fragments anguleux qui sont étrangers aux terrains où on les trouve, et dont le mode de transport est inconnu. Les opinions des géologues, à ce sujet, ne sont pas les mêmes : les uns pensent que ces masses ont été amenées par les eaux, soit à l'aide de courants diluviens, soit par de grandes débâcles ; d'autres les assimilent aux moraines des glaciers, c'est-à-dire à ces blocs qui sont transportés par les fleuves de glace, et qui viennent se déposer à l'extrémité des glaciers après un laps de temps plus ou moins long ; à l'égard des glaciers dont l'extrémité plonge dans la mer, de grands courants ont pu, en transportant les glaçons, amener ces blocs dans les régions où on les trouve aujourd'hui.

Le transport des blocs erratiques n'est donc pas encore expliqué, quoique dans certaines localités, en suivant la succession de ces blocs, on soit remonté à peu

près à leur point de départ, comme cela est arrivé pour les Alpes. On ne peut douter, en effet, que les blocs que l'on retrouve à une certaine distance, jusque sur les pentes du Jura, ne proviennent de fragments détachés de ces premières montagnes. Ces fragments ont-ils été amenés par des débâcles et transportés par les eaux, ou sont-ils des moraines de grands glaciers alpins qui ont disparu? M. Charpentier, en admettant la seconde hypothèse, a montré que, pour cette région, ce fait s'expliquerait facilement en supposant que toutes les Alpes se fussent abaissées, les glaciers ayant dû, avant cet abaissement, s'étendre plus loin qu'aujourd'hui.

On a émis une autre opinion, qui consiste à supposer que la terre s'est trouvée jadis dans une phase de refroidissement, pendant laquelle les glaciers des hautes montagnes du globe ont avancé davantage; et qu'ensuite, s'étant échauffée, ils ont rétrogradé. Si ce fait était constaté, il viendrait à l'appui des vues émises par M. Poisson sur l'origine de la chaleur centrale (Voyez pag. 39).

M. Martins pense qu'il ne suffirait pas d'admettre un abaissement de température considérable pour expliquer l'ancienne extension des glaciers. En effet, la température moyenne de Genève est de 9°,56. La limite inférieure des neiges éternelles dans les régions environnantes est de 2700 mètres au-dessus du niveau de la mer, et les grands glaciers de Chamonix descendent en moyenne à 1550 mètres au-dessous de cette ligne. Si l'on admet que la température moyenne de Genève s'abaisse de 2°, la limite des neiges s'abaisserait de 375 mètres, et les glaciers qui sont à 1150 mètres au-dessus de la mer descendraient également de la même quantité. D'un autre côté, un glacier descendant d'autant plus bas qu'il vient de plus haut et que l'accumulation des neiges est plus considérable, le pied des glaciers serait à 400 mètres, au lieu d'être à 1150 mètres au-dessus du niveau de la mer. Un abaissement de 4° dans la température moyenne de Genève, qui deviendrait alors celle de Stockholm, ferait donc arriver les

glaciers du Mont-Blanc jusqu'au lac de Genève. C'est cet abaissement de température qui est admis par les géologues partisans de la période glacière.

On a aussi invoqué, en faveur de cette seconde hypothèse sur le transport des blocs erratiques, les stries parallèles creusées sur des roches, que l'on observe en plusieurs points du globe, mais principalement dans les Alpes, où le phénomène a été le mieux étudié, stries qui sont analogues à celles qui proviennent du frottement des glaciers.

Si les blocs erratiques et les stries creusées par leur transport ne proviennent pas de débâcles, et sont dus à d'anciens glaciers plus étendus que ceux qui existent à présent, il a fallu qu'un changement physique très-grand se soit produit à la surface de la terre; néanmoins cette manière de voir est encore un sujet de controverse. Il est nécessaire que de nouvelles observations viennent éclairer ce point important de physique terrestre, et jeter quelque jour sur les changements climatériques qui ont eu lieu lors de la dernière révolution du globe, avant l'apparition de l'homme sur la terre.



CHAPITRE II.

DES CLIMATS.

SECTION Ire.

§ I. — *Des changements survenus à la surface du globe depuis la formation des terrains primitifs jusqu'au temps actuel. — Apparition successive des êtres organisés.*

La surface du globe a subi bien des modifications avant d'arriver à son état actuel; à mesure que les terrains de sédiment se sont déposés, il est survenu des bouleversements, des plissements, des soulèvements, qui ont changé sa configuration : les climats durent être profondément modifiés lors de ces cataclysmes, et si l'on veut avoir quelques notions sur ce qu'ils étaient alors, il est nécessaire de prendre en considération les êtres organisés de ces diverses époques, dont les restes, plus ou moins bien conservés, se retrouvent dans les terrains de sédiment et servent même à les caractériser. (Voy., p. 19, la classification de ces principaux terrains.)

Les géologues ont établi treize systèmes de soulèvement, principalement étudiés en Europe, auxquels il faut avoir recours pour apprécier les changements que la surface terrestre a éprouvés dans son relief, depuis les premiers dépôts sédimentaires jusqu'à nos jours. Ces systèmes sont :

1er soulèvement, ou système du Hundsruck, entre le terrain cambrien et le terrain silurien.
2e » système des ballons, entre le terrain silurien et le terrain houiller.
3e » système nord d'Angleterre, entre le terrain houiller et le terrain pénéen.

4e soulèvement, ou système de Hainaut, entre le terrain pénéen et le grès vosgien.
5e » système du Rhin, entre le terrain vosgien et le trias.
6e » système du Thuringerwald, entre le trias et le terrain jurassique.
7e » système de la Côte-d'Or, entre le terrain jurassique et le grès vert.
8e » système du Viso, entre les deux terrains crétacés.
9e » système des Pyrénées, entre la craie supérieure et le calcaire parisien.
10e » système de Corse, entre le calcaire parisien et la molasse.
11e » système des Alpes occidentales, entre la molasse et le terrain subapennin.
12e » système des Alpes principales, entre le terrain subapennin et le diluvium.
13e » système du Ténare, après le diluvium et peut-être quelques alluvions modernes.

(Nous suivrons, pour l'étude des terrains de sédiment, la marche que M. Beudant a adoptée dans le *Cours élémentaire d'histoire naturelle*, partie géologique.)

Avant les premiers soulèvements connus, la surface terrestre n'avait que peu d'inégalités: les eaux devaient la couvrir en grande partie; lorsque les premiers dépôts sédimentaires ont eu lieu, lesquels ont contribué à former le terrain cambrien, il existait déjà en Europe des portions de terre au-dessus des eaux, qu'on ne connaît pas bien; aussi n'en citerons-nous qu'une seule, la Scandinavie, dans la crainte de commettre des erreurs. L'incertitude où l'on est à cet égard vient de ce que des terrains primitifs, qui d'abord étaient sous les eaux, ont pu ensuite être soulevés.

Ces portions de terre hors des eaux devaient probablement être couvertes d'une puissante végétation, à laquelle il faut rapporter les dépôts d'anthracite des terrains devoniens. Les mers étaient alors peuplées, et renfermaient plusieurs centaines d'espèces dont on retrouve maintenant les restes dans les couches fossilifères les plus anciennes.

Lorsqu'on étudie un terrain, il serait souvent impossible de reconnaître son âge relatif ou plutôt son rang de superposition, si les débris organiques qu'il renferme ne servaient pas à le caractériser. Ces débris fournissent également des documents précieux sur l'époque relative de l'apparition des êtres auxquels ils appartenaient, sur le développement de la vie, ainsi que sur les modifications qu'elle a éprouvées à la suite de changements survenus dans l'état physique du globe. Il existe effectivement une telle dépendance entre les conditions physiques extérieures et les êtres qui existaient à une certaine époque, que l'on peut jusqu'à un certain point, en comparant la flore et la faune de ces temps primitifs à celles des temps actuels, avoir quelques données sur les climats sous lesquels ils vivaient.

Comment la vie a-t-elle paru sur le globe, ou, en d'autres termes, comment la matière a-t-elle pu s'organiser de manière à former des êtres jouissant de la faculté de se reproduire, tant que les conditions climatériques n'éprouvèrent pas de changements très-notables? Comment la vie a-t-elle pu se présenter sous de nouvelles formes quand ces changements ont eu lieu? La science reste muette à ces questions; ne pouvant pénétrer les mystères de la création, elle doit se borner à étudier les faits et les causes qui les modifient, à établir leurs rapports et à en déduire les conséquences les plus immédiates.

Les forces créatrices ne s'exercent plus aujourd'hui comme dans les premiers âges du monde, en raison des changements survenus dans les climats et d'autres causes qui sont inconnues. La vie, effectivement, ne peut se développer que sous certaines conditions atmosphériques et sous l'influence combinée de la chaleur et de la lumière. Si ces conditions et cette influence sont différentes, les phénomènes de la vie le sont également, et il doit en résulter des modifications quelconques dans l'organisme; notre ignorance est telle, au surplus, sur la nature des forces créatrices, que si, par une cause

quelconque, tous les êtres étaient détruits, les substances diverses composant la croûte terrestre volatilisées par un excès de chaleur, et qu'il y eût ensuite un refroidissement graduel, les composés inorganiques et les divers terrains se reformeraient d'après les lois qui régissent la matière, tandis que nous ne voyons pas comment les germes des animaux et des végétaux pourraient se reproduire.

Il faut donc admettre l'existence d'une puissance créatrice, qui s'est manifestée à de certaines époques, qui n'agit plus aujourd'hui que pour perpétuer les espèces actuellement vivantes, et non pour former de nouveaux germes; mais, si une nouvelle révolution avait lieu, les organes de l'homme, des animaux et des plantes se modifieraient peut-être pour fonctionner dans des conditions différentes; des espèces disparaîtraient, d'autres nouvelles peut être aussi se montreraient.

Lorsque la matière a commencé à s'organiser, tout porte à croire qu'il a dû se former d'abord des corps mous et gélatineux, de l'organisation la plus simple, représentant, soit des zoophytes, soit des matières végétales, qui auront été promptement détruits, en raison même de leur constitution, de la température élevée des milieux ambiants et de la nature des eaux de cette époque. Il est à présumer que cette première organisation a dû se faire dans les eaux dont la température était de 80° à 90°, puisque nous voyons des conferves se développer et vivre dans des eaux thermales ayant cette température. Nous citerons encore, d'après M. de Humboldt, d'autres limites qui doivent être prises en considération; ce célèbre voyageur a vu des plantes herbacées supporter une température de 52° dans les plaines de l'Orénoque, et d'autres croître dans un sable noir ayant une température de 60°.

A l'époque où s'est formé le terrain cambrien, le plus ancien des terrains sédimentaires, composé de grauwackes schisteuses et de différentes couches de calcaires, il existait déjà des brachiopodes, des entroques et des polypiers, en petit nombre à la vérité, à en juger par les débris que

recèlent les diverses parties de ce terrain. Ces espèces étant déjà composées dans l'échelle des êtres, il est probable que la vie avait dû paraître depuis longtemps sur la terre. Entre le terrain cambrien et le suivant eut lieu le soulèvement du Hundsruck.

Pendant la formation du terrain silurien, postérieur au terrain cambrien, et composé de calcaires et de schistes micacés, on voit apparaître des trilobites, des productus, des térébratules, etc., et dans le règne végétal, des fucoïdes, plantes aquatiques, etc. A cette époque, la terre devait être couverte de marécages: aussi les premiers êtres formés étaient-ils organisés de manière à vivre dans les eaux ou les terrains humides.

Dans les premiers terrains de sédiment on trouve des débris des deux règnes organiques; on se demande dès lors si les animaux ont été créés avant ou après les végétaux, ou simultanément avec ces derniers? Les naturalistes n'ont pu répondre encore à cette question, attendu que ces débris organiques sont presque toujours mêlés ensemble. On est porté à croire néanmoins que la vie a dû commencer par les végétaux, attendu que les animaux se nourrissent de matières organisées, et les premiers peuvent prendre seulement dans l'atmosphère et dans l'eau leurs principes nutritifs.

Le terrain devonien, qui comprend le vieux grès rouge, des grès divers et surtout des schistes anthraciteux, nous apprend, par les débris organiques assez nombreux qu'il renferme, que la faune de cette époque se composait de polypiers, de différents genres de mollusques plus ou moins analogues à ceux qui avaient paru précédemment, de radiaires et de nombreux poissons; et la flore, de fougères, de calamites et de plantes peu différentes de celles qui devaient concourir à la formation de la houille, et dont les débris ont servi à constituer les plus anciens dépôts de combustibles.

La vie avait donc déjà une grande puissance; sauf quelques genres, les espèces qui existaient alors sont éteintes, ce qui fait supposer que les conditions climaté-

riques étaient tout autres que celles dans lesquelles nous nous trouvons. En général, on rencontre peu de débris de végétaux dans les premières formations; peut-être n'existait-il pas encore dans l'atmosphère une quantité suffisante de gaz acide carbonique pour que la végétation pût se développer avec force. On est d'autant plus porté à le croire, que l'anthracite, dont l'origine végétale ne saurait être mise en doute, ne tarda pas à se montrer aussitôt après l'apparition des premiers dépôts calcaires.

Les dépôts calcaires étaient dus probablement à des eaux thermales chargées de bicarbonate de chaux et d'autres sels de même base qui sortaient des fractures produites par la dislocation du sol. Une portion du gaz acide carbonique s'échappait dans l'air, tandis que l'autre restait en dissolution: une partie du carbonate de chaux se précipitait, et l'autre partie, ainsi que la chaux des autres composés, servaient à la formation du test des mollusques et des polypiers, qui ont concouru ensuite à la constitution des terrains calcaires. La composition de l'atmosphère devait donc être différente de ce qu'elle avait été avant. La végétation devint alors plus vigoureuse, et le bitume qui colore les premiers calcaires montre bien l'abondance des matières végétales. On place à cette époque le deuxième soulèvement, celui des ballons.

Nous arrivons à la formation de la houille, sur laquelle diverses opinions ont été émises; mais les géologues ont adopté assez généralement celle de Deluc, que M. Adolphe Brongniart a appuyée de preuves, et qui consiste à considérer les houillères comme analogues à d'anciennes tourbières, dans lesquelles les végétaux, entre autres les équisétacés, les sigillaria, etc., ont été enfouis sur place; par suite d'un abaissement graduel du sol, le lieu s'est rempli d'eau, puis de détritus de roches, qui ont formé le grès houiller et les schistes argileux; les excavations étant comblées, une nouvelle végétation s'est développée, ainsi de suite, de sorte que l'on a eu des alternatives de houille et de grès. On est d'autant plus porté à admettre cette opinion, que

l'on trouve dans des houillères des troncs verticaux creux, dont l'intérieur est rempli d'un grès quelquefois différent de celui qui entoure la périphérie. Cet état de choses indique nécessairement une formation de houille à l'endroit même où la végétation s'est développée.

La houille disséminée dans le grès houiller est formée de la réunion d'un grand nombre de végétaux qui ont conservé leurs caractères distinctifs après leur décomposition. Les grès subordonnés renferment des troncs et des tiges, les schistes les empreintes des feuilles. D'après M. Adolphe Brongniart, la flore houillère se compose de cryptogames vasculaires, fougères, lycopodiacées, équisétacées, ou familles analogues, et de phanérogames, gymnospermes, constituant la plupart des familles détruites, voisines des conifères et des cycadées. Les fougères en forment la moitié environ, les lépidodendrées (analogues aux lycopodiacées), près d'un quart; le reste se rapporte aux conifères et aux familles gymnospermes actuellement détruites (sigillaria, stigmaria, noggerathia, etc.). De tous ces végétaux, on ne retrouve maintenant d'analogues, presque identiques, que quelques fougères qui croissent dans les régions tropicales et dont plusieurs sont arborescentes. Les monocotylédones et les dicotylédones vasculaires ne paraissent pas avoir de représentants dans cette flore.

Arrêtons-nous un instant pour signaler un fait caractéristique de cette époque. M. Jameson a constaté que les plantes des houillères des contrées boréales de l'Amérique sont semblables à celles qui se trouvent dans nos dépôts houillers. M. Robert Brown a trouvé, de son côté, que les fougères des houilles de la Nouvelle-Hollande sont du même genre que celles de notre continent. Doit-on en conclure que la végétation était uniforme sur toute la surface de la terre, par cela même que la chaleur centrale exerçait encore son action à l'extérieur d'une manière assez marquée pour que la différence des saisons et des climats ne fût pas encore bien sensible, et que la température, par conséquent, était à

peu près la même sur tous les points de la surface terrestre? Cette conséquence paraît assez naturelle; mais M. Alphonse de Candolle ne l'admet pas. Comment, dit-il, les mêmes végétaux ont-ils pu vivre à température égale sous la lumière intense des régions équatoriales et dans les contrées boréales qui en étaient privées pendant une grande partie de l'année? La lumière étant indispensable aux fonctions respiratoires et exhalantes des plantes quand la végétation est bien développée, on ne pourrait admettre que celles qui conservent leurs feuilles et ouvrent leurs stomates à la lumière douze heures sur vingt-quatre, eussent pu supporter une obscurité complète pendant plusieurs mois.

M. Lecoq a combattu cette objection. Suivant lui, beaucoup de plantes vivent dans l'obscurité et à la lumière, comme les fougères que l'on rencontre au fond des puits avec leur couleur verte; il suffit donc d'une faible lumière diffuse pour entretenir les phénomènes de la vie dans ces plantes. D'un autre côté, les forêts nourrissent des végétaux qui sont privés à peu près de l'action solaire par l'ombrage des arbres. La même chose a pu avoir lieu à l'époque de la végétation houillère. Plusieurs espèces, abritées sous les larges feuilles impénétrables des grands végétaux, devaient parcourir toutes les phases de leur existence en ne recevant qu'une faible influence solaire; ces mêmes végétaux pouvaient donc vivre aussi bien à température sensiblement égale sous l'équateur que dans les régions polaires. Ces raisons seraient de nature à réfuter l'objection de M. de Candolle s'il ne s'agissait, pour la flore houillère, que de plantes herbacées, d'arbustes ou d'arbres de moyenne grandeur. Mais les observations de MM. Jameson et Robert Brown portent principalement sur des fougères qui, en raison de leurs dimensions colossales, devaient être exposées sous l'équateur à une vive insolation. Cette nouvelle difficulté pourrait être néanmoins combattue en disant qu'il a bien pu se faire que la haute température de cette époque produisît une atmosphère vaporeuse, un voile épais

donnant lieu sur toute la surface de la terre à une espèce de crépuscule à l'aide duquel la végétation était sensiblement la même sur tous les points. Le climat vaporeux et chaud, également propre aux régions équatoriales et aux régions polaires, devait convenir parfaitement aux fougères, qui durent prendre un développement considérable. M. Élie de Beaumont (*Extrait de la Société philomatique de Paris*, 1836) signale, comme ayant dû concourir à répartir uniformément la chaleur sur le globe aux époques anciennes, l'absence des glaces polaires et les brouillards qui devaient apparaître aussitôt après le coucher du soleil. Ces brouillards, dus à la grande évaporation des eaux pendant le jour, devaient empêcher le rayonnement nocturne et rendre les climats plus uniformes sur toute la terre (1).

---

(1) Il ne sera pas sans intérêt de rapporter ici la quantité de carbone nécessaire pour former la houille, et les rapports entre celle qui est fournie par la respiration et la quantité qui en est absorbée par un hectare de bois dans un temps déterminé.

L'air, qui contient en volume 20,81 d'oxygène et 79,19 d'azote, ou en poids 23,01 d'oxygène et 76,99 d'azote, indépendamment de la vapeur d'eau et des gaz accidentels, renferme en moyenne actuellement $\frac{4}{10000}$ en volume de gaz acide carbonique, c'est-à-dire 0,00061 du poids de l'air. Or, la quantité totale d'air contenue dans l'atmosphère étant connue au moyen de la colonne barométrique, on en déduit que le poids total du carbone qui se trouve actuellement en moyenne dans l'atmosphère est représenté par celui d'une couche de $1^{mm},3$ de houille répandue à la surface de la terre.

D'après les calculs de M. Élie de Beaumont, 1° un taillis bien garni renferme à peu près la même quantité de carbone qu'une couche de houille de même surface et de 2 millimètres de puissance;

2° La plus belle futaie ne renferme pas plus de carbone qu'une couche de houille de même étendue et de 6 millimètres de puissance.

Un siècle de végétation forestière, dans les circonstances actuelles, ne pourrait donc produire au plus, par sa transformation, que 16 millimètres de houille. Dans un travail subséquent, M. Chevandier, a reconnu qu'il se formait 3500 kilogrammes de carbone, pendant une année, dans un hectare de prairie bien

On a avancé que l'époque de la végétation houillère n'avait pas été favorable au développement des animaux, parce qu'on ne trouve dans les grès houillers que des coquilles marines et d'eau douce; néanmoins, il y a des exceptions, car les couches de calcaires subordonnées à ces grès, près d'Édimbourg, renferment des restes d'énormes poissons sauroïdes. Les terrains houillers de Sarrebruck et d'Autun montrent également des restes de poissons appartenant à des genres voisins des esturgeons. Quant aux coquilles marines, elles sont rares, à la vérité, dans le grès houiller; il semblerait d'après cela que la vie animale, pendant la formation

---

fumée, proportion très-forte pour nos climats. Cette quantité représente une couche de houille de $\frac{32}{100}$ de millimètre d'épaisseur; ce serait 32 millimètres de houille par siècle.

D'après les calculs de MM. Andral et Gavarret, un homme de 30 à 40 ans, dans l'acte de la respiration, brûle par heure, en moyenne, 11 grammes de carbone; une femme du même âge, 7 grammes. On peut admettre en moyenne, homme et femme, $\frac{11+7}{2}$ = 9 gr., 5, à 33 ans.

Dans nos forêts, la végétation commence à la fin d'avril, pour s'arrêter à la fin de septembre; on peut compter en tout 5 mois ou 150 jours de végétation.

En moyenne, suivant M. Chevandier, le bois contient 0,50 de carbone; la production annuelle par hectare a été trouvée :

	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	Azote.	Cendres.
Pour une 1re forêt, âgée de 69 ans.	1754 kilogr.	213 kil.	1507 kil.	33 kil.	48 kil.
Pour une 2e forêt, âgée de 58 ans.	1854	225	1586	36	53

Cela posé, 1 hectare de forêt consomme en 24 heures, pendant les 150 jours de végétation dans nos climats,

$$\frac{1800}{150} = 12 \text{ kil. de carbone; par heure, 500 gr.}$$

Terme moyen, par jour de végétation ou non-végétation,

$$\frac{1800}{365} = 4 \text{ kil., 93, et par heure, 205 gr.}$$

Or, une personne consomme dans le même temps 9 grammes : donc 23 personnes fournissent dans le même temps, par la respiration, la quantité de carbone qui est enlevée en moyenne par la végétation d'un hectare de forêt dans nos climats.

houillère, aurait eu en général peu de puissance. Mais il est à remarquer que la formation de la houille ayant eu lieu dans des localités très-restreintes, on ne peut en tirer cette conséquence.

Nous allons essayer maintenant de donner une idée de la configuration de l'Europe, d'après M. Élie de Beaumont, non-seulement à l'époque houillère, mais encore aux principales époques géologiques, afin de montrer quelle a pu être son influence sur le climat à chacune de ces époques.

Les soulèvements du Hundsruck et des ballons, en exhaussant les dépôts cambriens, siluriens et devoniens, augmentèrent la superficie des terres déjà hors de l'eau, en même temps qu'ils changèrent leur configuration. Le calcaire carbonifère, ainsi que les diverses couches marines qui se trouvent dans le grès houiller, indiquent une mer, d'immenses marais maritimes, ou des golfes, s'étendant depuis les Ardennes et le Harz jusqu'aux montagnes d'ancienne formation des Iles Britanniques. En France comme en Allemagne, il existait de grandes terres dans lesquelles ou autour desquelles se trouvaient çà et là des lacs, des marais et des anses, où aboutissaient des cours d'eau venant y déposer des végétaux de toute grandeur et des débris de roches.

La carte planche III, figure 1, permet de voir quelles étaient, dans l'Europe occidentale, les positions relatives des mers de l'époque houillère, des terres émergées et des marais houillers. On n'a pu jusqu'ici déterminer nettement les limites des terres. On voit sur cette carte que les rivages des îles sont dirigés suivant les systèmes de soulèvement du Hundsruck et des ballons. Le premier court par O. 35° S. à E. 35° N., et le second par la même direction, à 3° près que le système des Pyrénées. Il est tout naturel que ces deux systèmes, qui avaient soulevé les terrains cambriens et siluriens, aient influé sur la direction des côtes. Dans la carte, les parties blanches représentent la mer où le calcaire carbonifère s'est déposé; les parties ombrées par des simples traits horizon-

taux, les terres hors de l'eau ; et les parties ombrées avec des lignes croisées, les dépôts de houille. Quant au tracé, qui indique, comme dans toutes les cartes, les contours des continents tels qu'ils sont actuellement, il n'a été fait que pour se rendre compte de la position des terres et des mers de cette époque. Au milieu de la mer se trouve une grande île, dont les limites ne sont pas bien connues. Les rivages où se trouvent Cork, Bristol et la pointe des Ardennes, sont dans la direction du système des ballons. Au sud de cette île, les dépôts houillers vont de Liége à Boulogne d'une part, et de Bristol au centre de l'Ecosse, de l'autre. Au nord ils vont de Derby à Liverpool, et se lient avec ceux du nord de l'Angleterre, de l'Écosse et de l'Irlande. Au milieu de ces dépôts se montrent des groupes de terrains anciens, formant des îles, dirigées suivant le système du Hundsruck. Dans le voisinage de Leicester, Coventry et Birmingham, on remarque des marais houillers isolés les uns des autres. La mer carbonifère ne paraît pas s'étendre vers le nord au delà du Hanovre.

Au sud de Bristol, on voit une île formée des terrains anciens du Devonshire et de Cornouailles, et qui n'étaient, peut-être, que le commencement d'une grande terre, au delà de laquelle on n'aperçoit aucune trace de la mer carbonifère, se rattachant d'une part aux Ardennes, et de l'autre à un continent dont nous allons indiquer, autant que possible, les limites.

Les terrains anciens et découverts de la Bretagne et du plateau central de la France formaient une grande terre, où étaient situés les lacs de Bayeux, de Quimper, de Laval et de Vouvant, enfermés dans les anfractuosités du système des ballons; ensuite, ceux de la Bourgogne, du Limousin, de l'Auvergne et du Forez, etc.; puis, ceux qui étaient situés dans des directions parallèles au système du Hundsruck. Cette grande terre s'étendait jusque vers Strasbourg ; à l'est, et peut-être réunie avec elle, il s'en trouvait une autre, comprenant tous les points où sont aujourd'hui Inspruck, Milan, Briançon, Gênes, Nice,

Toulon et l'île de Corse. Dans le voisinage de Toulon, il existait des marais qui sont aujourd'hui des dépôts de houille. Des terres se montraient également avec des dépôts houillers dans les contrées où se trouvent aujourd'hui la Bohême et la Saxe. Il existait probablement une île entre Cologne et Francfort, au midi de laquelle se trouvait le grand bassin houiller du pays de Trèves.

La presqu'île scandinave était déjà formée. Quelques dépôts s'y sont effectués seulement depuis les terrains siluriens. Cette terre, probablement, n'était pas couverte de marécages, puisque l'on n'y rencontre aucune trace de houille; peut-être même était-elle stérile.

On suppose que le lieu où est Paris, ainsi qu'une grande partie de l'Europe occidentale, était alors audessus des eaux, et qu'il existait peut-être, sur les terres, des marais houillers qui auront été ensevelis sous les mers par des catastrophes subséquentes. On se fonde pour cela sur ce que l'on ne rencontre point de calcaire carbonifère hors de la Belgique et de l'Angleterre.

Les terrains anciens que nous venons de signaler ont été constamment découverts jusqu'à nos jours, et même ont été soulevés, ainsi que la Bretagne et le plateau central de la France, par d'autres catastrophes. Par suite de ces soulèvements dans quelques localités, on rencontre des dépôts houillers jusqu'à une très-grande hauteur : le plateau de Santa-Fé de Bogota et les cordillères de Huarocheri, où l'on trouve de la houille à 2700 mètres et même à 4600 au-dessus du niveau de la mer, en sont des exemples. Dans d'autres localités, les terrains se sont affaissés et se sont recouverts de dépôts plus modernes, comme à Anzin, où la houille est audessous de la craie; dans les Vosges, où elle se trouve sous le grès rouge, et dans les Cévennes, sous le calcaire jurassique. Après la formation houillère, il y eut une nouvelle dislocation des terrains sédimentaires d'une partie de l'Europe, à la suite de laquelle parurent le trapp et autres roches d'origine ignée, qui s'épanchèrent sur les terrains houillers.

Le terrain pénéen, composé de grès rouge, de calcaire pénéen, parut à la même époque; le grès rouge ne renferme que très-peu de restes organiques, appartenant, comme en Angleterre, dans les Vosges et la Saxe, à des poissons, à des reptiles, et à des troncs de conifères. Les plantes ne présentant que des débris, il est à croire que le dépôt qui les renferme a été formé dans un liquide fortement agité. Au-dessus du grès rouge se montrent quelquefois des schistes bitumineux, renfermant des algues et quelques conifères. De nouvelles eaux thermales surgirent ensuite et produisirent les calcaires compactes, zechstein des Allemands, partagés en plusieurs couches par des marnes, des calcaires cellulaires, des calcaires magnésiens, puis de nouveaux calcaires compactes, des marnes et des matières argileuses.

On trouve pour la première fois dans cette formation des sauriens (ordre de reptiles comprenant les crocodiles, caïmans, etc.), voisins des genres iguane et monitor, puis des poissons des genres palæoniscus et amblypterus, analogues à ceux du terrain houiller, et qu'on ne retrouve plus ensuite; des spirifères et des productus qui avaient paru avant la formation de la houille.

Arrêtons-nous un instant pour signaler les progrès de la vie.

La vie se présente donc sous de nouvelles formes, puisque dans le règne animal on voit paraître les sauriens et de nombreux poissons; dans le règne végétal, les conifères, etc., etc. Il est à présumer que la formation des plantes houillères ayant déjà enlevé à l'air un grand excès de gaz acide carbonique, qui s'y trouvait après l'apparition du bicarbonate de chaux, les reptiles et autres animaux des classes inférieures, qui n'ont pas besoin d'une atmosphère aussi épurée que les animaux des premières classes, purent y vivre et s'y développer. Il paraîtrait qu'il existait déjà des reptiles dans les terrains houillers, autant qu'on peut en juger d'après les découvertes faites en Amérique.

Cet état de choses fut interrompu en Europe par les

soulèvements du Hainaut, de quelques parties de la Saxe et du Harz. La formation de calcaire cessa et fut remplacée par celle du grès vosgien, dans lequel on n'a encore trouvé qu'un très-petit nombre de fossiles, consistant seulement en empreintes rares de calamites et de conifères.

Le grès bigarré, qui vient après, comme en Amérique, conserve des empreintes de pas d'oiseaux, et celui de Hesse des pas de batraciens.

Après le grès vosgien eut lieu le cinquième soulèvement; ensuite commença la période du trias, terrain formé, comme son nom l'annonce, de trois parties: le grès bigarré, le calcaire conchylien, et les marnes irisées qui occupent la partie supérieure. Il faut aller jusqu'au calcaire pour trouver des débris organiques appartenant à un grand nombre de coquilles, l'ammonite à nœuds, la possidonia minuta, des encrines, des trigonies que l'on voit pour la première fois, et qui se retrouvent dans les terrains supérieurs jusque dans la craie; les productus sont remplacés par les gryphées, etc., etc. On rencontre dans quelques contrées, comme à Lunéville, dans le Wurtemberg et dans le pays de Bareuth, de grands sauriens. Le règne végétal est représenté par des fougères d'espèces particulières, des cycadées, et par des plantes nouvelles.

Pendant cette période, l'apparition de nouvelles sources calcarifères produisit encore un dégagement de gaz acide carbonique, suivi d'une végétation vigoureuse et d'une nouvelle formation de houille.

Nous arrivons à la période jurassique, pendant laquelle, en raison de sa grande durée, la vie s'est développée tranquillement, aucune grande catastrophe n'étant venue l'interrompre. Les terrains auxquels elle a donné naissance se composent de dépôts alternatifs, d'argile plus ou moins sableuse, et de calcaires de diverses espèces, souvent oolitiques. Les dépôts d'argile ont été formés probablement à l'embouchure des fleuves, et ont constitué ainsi des deltas. Dans la partie inférieure de cette forma-

tion se trouve le lias, ou calcaire à gryphée arquée, ainsi appelé à cause du grand nombre de coquilles de ce nom qu'il renferme. Les parties inférieures présentent particulièrement diverses espèces d'échinides.

Les gryphées se rencontrent dans les parties moyennes, et les bélemnites que l'on voit, pour la première fois, dans les parties supérieures. Cette même formation renferme, en outre, un grand nombre d'ammonites de diverses espèces, et des coquilles nouvelles qui disparaissent bientôt après. Le lias commence à nous montrer les ichthyosaurus et les plesiosaurus, qui tiennent à la fois du lézard, du crocodile, du poisson et des mammifères. La longueur des premiers pouvait aller jusqu'à sept mètres; celle des seconds, jusqu'à quatre. On voit paraître également, pour la première fois, les ptérodactyles ou sauriens volants. Tous ces fossiles sont accompagnés d'une quantité innombrable de coprolites qui en provenaient. Les débris de poissons et de reptiles trouvés au milieu de leurs squelettes prouvent que ces êtres se nourrissaient d'animaux aquatiques.

Parmi les sauriens de cette époque, on cite le megalosaurus, tenant à la fois du crocodile et du monitor, et dont la longueur pouvait aller à quinze ou vingt mètres.

Les conifères déjà signalés sont rares dans le lias. Sa flore était formée de cycadées et de diverses espèces de fougères, qui produisirent quelques dépôts de combustibles.

Au-dessus du lias se trouve le système oolitique, composé des quatre groupes suivants, caractérisés chacun par les fossiles qui leur sont propres.

1° *Groupe de la grande oolitique.* Ce groupe renferme la gryphea cymbium, l'ostrea acuminata, des térébratules, diverses espèces d'ammonites, et une grande quantité de coquilles variées. Dans les marnes à calcaire fissile, des mammifères, représentés par des marsupiaux et de grands cétacés.

Les conifères y sont plus abondants que dans le calcaire conchylien, et sont accompagnés de cycadées et de fougères différentes des formations précédentes.

2° *Groupe oxfordien.* Il renferme abondamment des ammonites, et une espèce nouvelle de gryphées, l'ostrea Marshii, etc.

3° *Groupe corallien.* Il est caractérisé par de nombreux polypiers et des madrépores d'un grand nombre d'espèces, et par un nombre considérable de coquilles, parmi lesquelles nous citerons des nérinées, des astartes, des échinodermes, etc.

4° *Groupe portlandien.* Ce groupe renferme une immense quantité d'huîtres et d'exogyres d'espèces particulières, des ammonites. On y trouve aussi, comme dans le précédent, de petits amas de combustible.

Ces données suffisent pour avoir une idée du climat de l'Europe occidentale à cette époque; mais avant d'en parler, nous indiquerons quelle était la configuration de cette partie de la surface du globe. Pour bien se rendre compte des changements opérés, il faut reprendre la carte, planche III, fig. 1, qui représente la formation carbonifère, et la comparer à celle que nous allons décrire fig. 2 de la même planche. Les parties légèrement ombrées représentent les mers, celles qui le sont davantage se rapportent aux terres situées alors hors de l'eau.

Le soulèvement du Thuringerwald, en exhaussant le terrain triasique sur différents points, avait rattaché des portions de grès bigarré au plateau central de la France, entre Moulins et la Châtre, entre Brives et Tulle, aux environs de Rhodez, de Sainte-Affrique et de Lodève. Ces mêmes grès, ainsi que le calcaire conchylien, avaient concouru aussi à augmenter l'île du Var. Les Vosges et la forêt Noire prirent également de l'extension, d'une part à l'ouest, dans la Lorraine, de l'autre à l'est, et rattachèrent ensemble plusieurs parties séparées. Tous les îlots qui marquaient la place de la Grande-Bretagne furent réunis par le soulèvement du terrain triasique. En même temps que de nouvelles terres surgissaient au-dessus des eaux, d'autres s'affaissaient; celle qui s'étendait de Cherbourg à Perpignan

fut coupée vers Poitiers, en formant un détroit où l'on trouve aujourd'hui la formation jurassique, puis morcelée sur les bords et réduite à un isthme très-étroit vers Rhodez. Tout ce qui était compris entre Nice et Inspruck fut complétement enfoncé. Les portions de terre qui pouvaient exister dans les lieux où se trouvent Paris, Londres, etc., à l'époque houillère, avaient probablement disparu, attendu que le terrain jurassique paraît se prolonger partout au-dessous du sol où sont situées ces capitales.

Quant à la Scandinavie, nous n'avons à signaler aucune formation nouvelle ni les effets d'aucun cataclysme, puisque sa constitution physique n'a pas changé.

La configuration des terres se trouve assez nettement indiquée sur la carte jurassique, pl. III, fig. 2. L'espace occupé par la mer est précisément celui dans lequel se sont déposés les divers terrains jurassiques.

A l'époque jurassique, il y avait encore une grande uniformité dans la température terrestre, car les dépôts sédimentaires s'étendaient dans l'intérieur de la Russie, jusqu'au delà du cercle polaire. Cependant les dépôts d'argile ont une telle puissance, que les fleuves qui les ont formés à leur embouchure devaient avoir une grande force. L'abaissement de température devait rendre les pluies plus abondantes, et augmenter par suite l'étendue et la violence des cours d'eau.

Les continents commençant à prendre de l'extension, et la terre continuant à se refroidir, le climat continental devait présenter des différences avec celui des côtes, ce qui n'avait pas eu lieu d'une manière aussi sensible pendant la période houillère, où l'action des forces organiques paraît avoir été à peu près la même sur tous les points de la surface du globe.

Les ichthyosaurus, plesiosaurus, pterodactylus, etc., qui paraissaient pour la première fois, vivaient alternativement comme les crocodiles, dans la mer, dans l'eau douce, et sur terre. Ces animaux devaient donc se trouver à l'embouchure des fleuves : aussi la présence de

leurs ossements dans une localité annonce-t-elle le voisinage d'un ancien continent.

Les terrains houillers étant d'une formation d'eau douce, il est à croire que l'état du globe aux époques les plus anciennes, était analogue à celui des temps postérieurs, sauf les différences provenant de la diversité des climats; aussi les terres étaient sillonnées par des courants d'eau douce, comme elles le sont aujourd'hui. En raison du peu de relief des continents, les eaux de la mer devaient se mêler aux eaux douces et les rendre saumâtres. Les mollusques et les zoophytes étaient en si grand nombre, que leurs dépouilles forment des couches entières.

Lors de la formation houillère, il existait déjà plusieurs ordres d'insectes que l'on retrouve encore çà et là dans les dépôts jurassiques.

Quant à la flore, les cycadées, qui avaient acquis de grandes dimensions, formaient la moitié des plantes connues de cette époque.

La période jurassique étant accomplie, de nouvelles conditions atmosphériques et terrestres, par suite du soulèvement du système de la Côte-d'Or, amenèrent la formation du terrain crétacé inférieur, dans lequel les polypiers, les radiaires et les mollusques continuèrent à se montrer abondamment, et auxquels il faut ajouter un grand nombre de genres et d'espèces nouvelles. Les gryphées, remplacées par les exogyres, cessèrent de se montrer, et l'on vit paraître de nouvelles espèces de bélemnites et d'ammonites. Les premiers dépôts crétacés renferment des paludines, dont la présence annonce des affluents d'eau douce dans la mer où ils se sont formés, et des lignites provenant de conifères ; les dicotylédons n'existaient pas encore.

Dans le grès vert et la craie tufau, les débris organiques y sont très-abondants; nous mentionnerons, parmi les poissons, les squales, qui ont remplacé les poissons sauroïdes et les sauriens nageurs.

Le terrain crétacé supérieur, dont la craie propre-

ment dite fait partie, est composé, comme dans quelques localités, d'une immense quantité de coquilles microscopiques appartenant au groupe des foraminifères. On y rencontre des bélemnites d'espèces particulières, etc., et, dans la partie supérieure, l'animal de Maëstricht, énorme saurien, ainsi que des débris de mammifères cétacés, tels que lamentins et dauphins. Les deux tiers des espèces de la craie appartiennent à des genres qui n'existent plus aujourd'hui.

La flore de la craie proprement dite ne présente qu'un petit nombre d'espèces appartenant en général à des plantes marines; tandis que, dans la formation crayeuse en général, on cite parmi les espèces recueillies : des fucoïdes, des fougères, une cycadée, un conifère, etc.

La carte de la mer crétacée (planche IV, fig. 1), que nous devons encore à M. Élie de Beaumont, fait connaître la configuration et l'étendue relative des terres et des mers dans l'Europe occidentale pendant le dépôt du terrain crétacé inférieur. Les parties les plus fortement ombrées sont les terres; celles qui le sont moins, représentent des mers.

Une portion des dépôts jurassiques ayant été soulevée au-dessus des mers par le système de la Côte-d'Or, la forme et la disposition des continents furent considérablement changées. Les contours des terres ne sont autres que les limites inférieures de la craie.

A l'époque précédente, l'Europe formait trois îles séparées; dans cette période, ces trois îles sont réunies et leurs contours sont changés. Bruxelles, qui était au milieu des terres, se trouve ici sur la côte; Arras, Dunkerque, Maëstricht, Paris, qui étaient au-dessus des eaux, sont maintenant au-dessous. Entre Dresde, Berlin et Prague, se trouve un lac; entre Perpignan et Carcassonne, un détroit. La faible portion des Pyrénées déjà existante est en partie submergée.

Les Vosges, qui formaient des côtes, se trouvent au milieu des terres; la mer qui les séparait est comblée.

Langres, Nevers, Lyon, Toulouse et Oxford se trouvent en terre ferme. Vers Poitiers il existe un isthme; de Perpignan à Cracovie, il y a une suite continue de côtes; entre Bruxelles et Oxford, un vaste golfe; entre Saltzbourg et Avignon, il existe une grande île qui occupe la place future des Alpes; à la place que doit occuper la Suisse se montre un canal qui sépare cette île de la terre ferme; Toulon forme une petite île, et la place de Marseille est occupée par des îles de très-peu d'étendue.

La chaleur centrale continuant à diminuer, l'influence des saisons devait être plus sensible, et d'autant plus que la croûte de la terre, augmentant en épaisseur, s'opposait à la transmission de la chaleur centrale. Après la craie eut lieu le soulèvement des Pyrénées. Avant d'arriver au terrain parisien, au-dessus de la craie, le 8e et le 9e soulèvement s'étaient effectués. Les terrains tertiaires supérieurs ne se formaient plus qu'entre certaines limites qui ne dépassaient pas le 50° de latitude, quant aux terrains calcaires, car relativement aux formations arénacées, les dépôts se sont effectués jusqu'au cercle polaire, comme la Norvége en offre des exemples.

Ces terrains commencent par des argiles dans lesquelles on rencontre pour la première fois, avec des conifères, des phanérogames monocotylédons, des palmiers, des dicotylédons, des coquilles d'eau douce, et, dans la partie supérieure, des coquilles marines. Au-dessus des argiles se trouvent des bancs puissants de calcaire grossier renfermant une immense quantité de coquilles, particulièrement de cérites d'espèces différentes de celles actuellement vivantes, des madrépores et des restes de cétacés ayant leurs analogues dans nos mers; vient ensuite le calcaire siliceux, dont les parties inférieures renferment beaucoup de coquilles fluviatiles, telles que lymnées et planorbes. Après se présente la formation gypseuse; la faune de cette époque avait plus de ressemblance avec celle de l'époque actuelle, par cela même qu'elle renfermait un plus grand nombre de

mammifères. Ces derniers appartenaient au genre palæotherium, anoplotherium, ayant de la ressemblance avec le rhinocéros et le tapir, etc. Les oiseaux étaient en moins grand nombre que les mammifères; peut-être leurs organes étaient-ils trop sensibles pour vivre dans une atmosphère qui n'était pas encore entièrement épurée ; cependant, nous devons faire observer qu'il en existait avant, puisque dans le grès bigarré, en Amérique, on a trouvé des pas d'oiseaux de grande dimension, et des ossements de cette classe d'animaux, dans les parties les plus inférieures du terrain crétacé. Quant aux poissons, ils avaient la plus grande ressemblance avec ceux des mers actuelles.

Après l'argile plastique, on ne rencontre plus que des débris d'un nombre assez considérable de végétaux disséminés çà et là, et appartenant soit à des plantes marines, soit à des plantes terrestres, comme les palmiers, ou représentant seulement des empreintes de dicotylédones.

Les débris organiques renfermés dans le terrain parisien prouvent, d'après M. Élie de Beaumont, que la température de la terre à l'époque de la formation de ce terrain, dans nos contrées, était encore celle de l'Égypte. L'abondance des pluies y était telle, qu'il devait se former de grands fleuves. Les eaux des continents devenaient plus pures, puisque les dépôts marins sont plus nettement séparés que dans les formations précédentes.

M. Élie de Beaumont a représenté dans la carte, planche IV, fig. 2, la configuration de l'Europe continentale à l'époque de la formation du terrain parisien. La partie ombrée indique les mers qui existaient à cette époque et dans lesquelles cette formation s'est effectuée.

La constitution géographique de l'Europe occidentale, après la période jurassique, fut changée par le soulèvement du mont Viso et par celui qui produisit ensuite les Pyrénées, les Apennins et toutes les chaînes parallèles. Le premier ébranla tellement l'Europe, que la

plus grande partie du globe, qui était alors sous les eaux, fut soulevée pour former un continent. Ce motif explique pourquoi les terrains parisiens ont peu d'étendue. Les dépôts de sédiment qui les composent se trouvent concentrés, d'une part, dans la Belgique, l'Artois, la Picardie, l'Ile de France, la Normandie et les côtes opposées de l'Angleterre, et, de l'autre, aux environs de Bordeaux; on en trouve à peine quelques traces bien caractérisées, dans d'autres localités; il y avait alors très-peu de mers intérieures. Il ne restait plus du vaste océan des précédentes périodes qu'une partie du golfe limité jadis vers Cambridge, Oxford, Exeter, Cherbourg, Angers, Poitiers, rétréci en plusieurs points et augmenté ailleurs aux dépens de l'ancienne presqu'île de Bruxelles. Cet océan communiquait probablement avec des restes des mers du Nord.

Après le terrain parisien eut lieu le 10ᵉ soulèvement (système de Corse); puis parut le terrain de molasse, placé, dans le bassin de Paris, au-dessus des gypses, et formant souvent des masses de grès dans lesquelles on rencontre quelquefois des coquilles du calcaire grossier, des dépôts lacustres remplis de lymnées, de planorbes, etc.; dans d'autres contrées, ce terrain n'a plus cette constitution : il commence ordinairement par des dépôts d'eau douce renfermant des lignites, et qui sont tantôt calcaires, tantôt arénacés, comme dans plusieurs parties du midi de la France. Il arrive aussi souvent que le calcaire est subordonné au grès. Ces premiers dépôts sont quelquefois recouverts, comme en Touraine, de faluns ou détritus de coquilles appartenant à des espèces dont les dix-huit centièmes, d'après M. Deshayes, sont identiques avec celles qui vivent dans nos mers.

Ces terrains renferment en outre des espèces de palæotherium différentes de celles du gypse, des débris de mastodonte, de dinotherium giganteum. Le combustible y est très-abondant et s'y trouve à l'état de lignite, comme en Languedoc, en Provence et en Suisse; il

provient de conifères. Les plantes dicotylédones y sont fort nombreuses. On y trouve des bois à l'état siliceux. Dans les argiles qui accompagnent les lignites, on rencontre des empreintes de feuilles de dicotylédones appartenant à des noyers, ormes, érables, bouleaux entièrement semblables à ceux qui existent aujourd'hui. Des plantes monocotylédones et des bois ayant la structure du palmier se trouvent au milieu des dépôts de combustible, dans les sables et les argiles.

Par le soulèvement des Alpes occidentales (11e système) toute l'Europe fut ébranlée. Le sol compris entre Constance et Marseille prit un grand relief. Ensuite parurent tous les carnivores appartenant aux genres ursus, hyæna, felis, canis, qui habitaient les cavernes; après quoi eut lieu le 12e soulèvement, celui des Alpes principales.

Le terrain subapennin, qui vient après, a une origine lacustre et marine. La première division, observée dans la Bresse, est composée de dépôts alternatifs de galets, de sables et d'argiles grossières. La deuxième division, qui s'étend de Turin à l'extrémité de l'Italie, est formée principalement de matières sableuses, au milieu desquelles se trouvent des couches de marne. Cette division renferme un grand nombre de coquilles marines dont la moitié vivent aujourd'hui dans la Méditerranée. Les formations les plus nouvelles sont donc celles qui renferment le plus de coquilles semblables à celles qui existent aujourd'hui dans nos mers. Il existe dans ce terrain des lignites qu'on exploite avec avantage dans plusieurs localités. On doit rapporter à cette formation le remplissage du terrain jurassique par des minerais de fer, des brèches osseuses, comme à Cette, Antibes, Gibraltar, etc. Dans les formations précédentes, la nature organique se revêt de formes nouvelles qui se rapprochent de plus en plus de celles de notre époque. Les animaux mammifères ne se montrent en grand nombre que longtemps après la craie, alors que l'air ne renfermait plus qu'une très-faible portion de gaz acide carbo-

nique qui ne s'opposait plus à leur entier développement. La végétation devait être encore néanmoins très-vigoureuse, autant que l'on en juge par les grands dépôts de lignites que l'on rencontre dans les parties inférieures des argiles plastiques, et qui ne se distinguent des houilles qu'en ce qu'ils ne sont composés que de dicotylédons ou de conifères.

La période dont il est question, c'est-à-dire celle qui a commencé après la craie, a dû être très-longue. Suivant M. Élie de Beaumont, elle a été interrompue par le soulèvement des montagnes de la Corse et de la Sardaigne. Il faut placer ici le 13e et dernier soulèvement. En désignant les soulèvements par des numéros, nous avons en cela suivi l'usage; mais M. Élie de Beaumont ne l'adopte pas, attendu que des observations ultérieures peuvent conduire à la découverte de nouveaux soulèvements, que l'on intercalera entre ceux que nous connaissons et que nous avons décrits.

L'Europe, après l'apparition des Alpes principales, reçut sa forme et son relief actuels; puis parurent les alluvions anciennes, composées de tous les dépôts qui se sont faits dans les rivières, dans les mers, les lacs, etc., avant les temps historiques. Elles sont le résultat de grandes débâcles; leurs dépôts dépassent le niveau que les eaux actuelles ne sauraient atteindre, et couvrent tous nos continents. Ces alluvions ont été rapportées à l'époque du déluge, et ont été appelées, en raison de cela, *diluvium;* mais aujourd'hui, comme l'on sait que les Andes sont le résultat d'un cataclysme plus récent, il serait plus naturel de rapporter le diluvium aux alluvions de cette époque.

Le douzième cataclysme donna naissance à la mer Méditerranée, ou du moins à sa communication avec l'Océan. De très-grands courants d'eau s'établirent dans toutes sortes de directions, et sillonnèrent les dépôts à découvert. Le volume des eaux fourni par les lacs, dont les digues furent sans doute rompues, n'étant pas en rapport avec la grandeur des effets produits, il est à croire qu'il

fut prodigieusement accru par la fonte subite des neiges et des glaciers accumulés sur les Alpes occidentales.

C'est lors de ce cataclysme qu'eut lieu la séparation de la France et de l'Angleterre, aussi bien que celle de l'Irlande; le golfe de Bothnie s'est peut-être produit aussi à cette époque, attendu que les dépôts coquilliers qui se trouvent en quelques points sur les côtes sont tout au plus contemporains des terrains subapennins.

On rapporte à cette époque géologique les blocs erratiques et l'anéantissement de races d'animaux qui s'étaient formées depuis la formation des faluns. Les débris de mammifères trouvés dans les terrains de transport appartiennent aux genres éléphant, mastodonte, hippopotame, rhinocéros, tapir, cerf, bœuf, hyène, mégatherium, etc. On y trouve un mélange de carnivores et d'herbivores; les premiers étaient à peine représentés à l'époque du gypse. Il est à remarquer que les animaux des tropiques sont mélangés avec les espèces des zones tempérées, et même de la zone glaciale.

Cette révolution qui a bouleversé une grande partie du globe, depuis la hauteur de l'Espagne jusqu'au centre de l'Asie, a été accompagnée d'un refroidissement qui a donné lieu aux climats actuels. Avant cette révolution, la température moyenne était peut-être, suivant M. Élie de Beaumont, la moyenne des températures qui s'observent, sous les mêmes parallèles, dans les autres parties du monde; tandis que, aujourd'hui, cette température est différente par suite du changement de relief. Quoi qu'il en soit, les palmiers ont cessé de végéter en Europe depuis lors, et les plantes dicotylédones ont considérablement accru en nombre. Les éléphants, les rhinocéros, les panthères, ont cessé de paraître; la faune a été remplacée par celle qui existe aujourd'hui.

Doit-on rapporter au diluvium cet ossuaire immense des côtes de Sibérie et des îles adjacentes? Des animaux entiers ensevelis sous les glaces conservent encore leur chair depuis des milliers d'années; les éléphants, les mastodontes et les rhinocéros y sont couverts de poils,

indices qui portent à croire qu'ils étaient destinés à vivre dans des climats glacés. Ces animaux ont pu être surpris lors de débâcles occasionnées par un soulèvement, et entraînés à plusieurs pieds de profondeur dans un sol constamment gelé. Ils ont pu aussi être entraînés très-loin par les rivières, qui les ont abandonnés au milieu des sables où le froid les a promptement saisis. Leur destruction, en tout cas, est l'effet d'une révolution subite.

Nous arrivons à l'époque de l'apparition de l'homme sur la terre, dernière œuvre de la création. Cette apparition est-elle contemporaine de celle des grands pachydermes, ou bien l'a-t-elle suivie? On l'ignore. L'absence d'ossements fossiles humains dans les alluvions anciennes fait supposer que l'homme ne parut que lorsque la terre fut à l'abri des grandes révolutions qui avaient si fréquemment bouleversé sa surface.

Depuis, les volcans, les tremblements de terre, continuent à agir; certaines contrées se soulèvent journellement; des volcans sous-marins se font jour malgré les eaux; les forces organiques produisent des îles ou des bancs de coraux; mais tous ces phénomènes n'ont pas réagi sensiblement ni sur la configuration générale, ni sur le climat des continents.

Des terrains de sédiment ou alluvions modernes sont formés, depuis les temps historiques, à l'embouchure ou le long des fleuves, dans les lacs et les mers, qui se remplissent peu à peu de tous les débris que leur apportent les eaux; dans les marais, où se forment des tourbes, et où se déposent du fer limoneux et des carapaces d'infusoires. Dans tous ces dépôts, il se produit souvent des tufs calcaires. On doit rapporter encore à cette formation les dépôts coquilliers marins, dans lesquels on trouve des restes de l'industrie humaine, comme on en voit sur les côtes de la Sicile et de l'Italie, et les brèches à ossements humains de la Guadeloupe.

En résumé, la matière organisée s'est montrée, dans les premiers temps de la formation de la terre, sous des

formes d'abord peu variées mais déjà composées. A l'époque des houilles, la famille des fougères formait plus de la moitié de la flore. Lors de la formation jurassique, les cycadées et les conifères se montrèrent en très-grande proportion ; les espèces, les genres, les familles, devinrent ensuite plus nombreux jusqu'à l'époque actuelle. Le règne animal a suivi la même marche. D'abord des zoophytes, des mollusques, des crustacés et des poissons, qui s'associent aux insectes, aux reptiles, aux cétacés, aux mammifères et aux oiseaux. L'homme parut en dernier lieu.

Il ne semble pas y avoir eu d'interruption dans la série des créations : les forces organiques ont toujours agi, en procédant du simple au composé. Jusqu'à la formation houillère, il y avait uniformité de température sur toute la surface du globe, et par suite uniformité de création pour tous les êtres qui exigeaient une égale action solaire; mais des changements étant survenus peu à peu dans l'état calorifique, l'humidité et, dans la composition de l'atmosphère, les forces organiques furent nécessairement modifiées ; de là le développement incessant des deux règnes. A l'époque actuelle, où la chaleur intérieure n'exerce plus d'influence sur les climats, où la configuration du globe ne change plus sensiblement par suite de violentes commotions intérieures, et où la composition de l'atmosphère ne semble pas éprouver de variations, les modifications dans l'organisme ne paraissent plus porter que sur les variétés.

L'état calorifique de notre globe est aujourd'hui à peu près stationnaire; mais en sera-t-il toujours ainsi dans la suite des siècles, cela est douteux; car les grandes révolutions ayant eu lieu à des époques extrêmement éloignées, rien ne nous prouve qu'il n'y en aura plus de nouvelles. A la vérité, la croûte ayant acquis plus d'épaisseur est moins exposée à se rider que par le passé ; mais il n'est pas dit pour cela qu'aucun plissement ne se reproduira plus, surtout quand nous voyons, par les tremblements de terre et les volcans, que les actions in-

térieures n'ont pas cessé, et que certaines parties du globe, telles que les côtes de la Baltique, sont soulevées continuellement. Si l'on fait attention en outre qu'après le soulèvement des Alpes occidentales, le climat de l'Europe fut modifié, on ne peut prévoir les changements qui s'opéreront un jour sur la surface du globe, puisqu'ils dépendront de la configuration des continents; il pourrait donc arriver que, par suite d'un exhaussement, la France eût le même climat que celui du Canada.

§ II. — *Époque de la dernière révolution du globe.*

A-t-on des moyens de supputer l'époque de la dernière révolution du globe qui a mis les mers dans leurs bassins actuels? Dans l'impossibilité où l'on est de préciser cette époque, on en est réduit à évaluer approximativement le temps qui s'est écoulé depuis qu'un changement déterminé sous les influences atmosphériques ou autres, et qui continue encore de nos jours, a commencé à se produire.

Pour remonter aux époques géologiques qui précèdent les temps historiques, on consulte les débris qu'entraînent les fleuves, et qu'ils déposent sur leurs bords ou à leur embouchure, et on suppute le nombre de couches dont les dépôts sont formés, comme on le fait à l'égard des cercles concentriques qui forment un tronc d'arbre dont on veut connaître l'âge.

On pense généralement, et c'est une croyance très-ancienne, que le delta du Nil occupe l'emplacement d'un immense golfe; ce delta, qui est un atterrissement du Nil, est aujourd'hui la province la plus féconde de l'Égypte. Les fouilles qu'on y a faites ne laissent aucun doute à cet égard. Damiette, où débarqua saint Louis en 1249, est aujourd'hui à une lieue et demie de la mer. En admettant que ces accroissements soient proportionnels aux temps qu'ils ont mis à se faire, on en a conclu que le delta, qui a environ 50 lieues de profondeur, avait mis 18000 ans à se former. Mais cette conclusion

n'est pas admissible, attendu que les atterrissements ne sont pas soumis à une marche régulière; en effet, Dolomieu s'exprime ainsi en parlant des atterrissements du Nil (*Journal de Physique*, t. XLII, p. 47): « Je « compte même me servir de ces atterrissements, et de « leur peu d'étendue en comparaison de ce qu'ils pour- « raient être d'après leur accroissement journalier, s'ils « avaient commencé depuis beaucoup de milliers d'an- « nées; je les emploierai, dis-je, avec beaucoup d'au- « tres faits analogues, pour soutenir mon opinion sur « le peu d'ancienneté de l'état actuel de notre globe, et « pour rapprocher de nous l'époque du dernier cata- « clysme, contre le sentiment de plusieurs hommes illus- « tres. »

M. Élie de Beaumont, ayant cherché à appliquer les remarques de Dolomieu aux alluvions du Mississipi, qui se déposent avec beaucoup plus de rapidité qu'aucun autre fleuve, a rencontré des difficultés telles, qu'on arriverait à cette conséquence, qu'il regarde lui-même comme absurde, que le delta de ce fleuve aurait commencé à se former à une époque postérieure aux premiers siècles de l'ère chrétienne. Ce résultat paraît prouver que la rapidité actuelle du progrès du delta est une anomalie liée à l'endiguement du fleuve et aux grands défrichements de l'Amérique du Nord.

Le Pô présente une semblable anomalie: M. Élie de Beaumont, en soumettant au même mode d'investigation les deltas du Rhin, du Rhône, du Nil et du Gange, a reconnu que l'histoire de la formation de ces deltas peut être partagée en deux périodes (*Leçons de Géologie*, t. I. p. 519): « Pendant la première, le fleuve « s'est formé un premier lit dans les lagunes qu'il a « comblées; dans la seconde, il a abandonné ce premier « lit, déjà trop exhaussé, et il s'est déversé latéralement « en se formant de nouveaux lits, dont plusieurs lui « servent encore aujourd'hui. Le travail de la deuxième « période a été accéléré par l'effet des défrichements, « mais pendant quelques siècles seulement, et peut-être

« très-faiblement pour certains fleuves, tels que le Rhin, « le Rhône, le Nil. Or, ce travail de la seconde période « est en masse très-comparable à celui de la première, « si même il ne le surpasse pas; et comme il n'y a guère « que deux, trois ou quatre mille ans que cette seconde « période a commencé, on voit que rien ne conduit à « faire remonter l'origine des deltas a un grand nom- « bre de milliers d'années. »

Dans l'application que l'on fait de la marche des atterrissements à la recherche d'époques anciennes, il faut encore se mettre en garde contre des causes qui viennent l'entraver d'une manière quelconque. Ainsi, quand un port a été comblé, il faut examiner s'il l'a été entièrement par des alluvions, ou seulement par l'effet naturel des vagues qui transportent irrégulièrement d'un côté les débris qu'elles ont enlevés de l'autre; il faut examiner encore les faits historiques qui peuvent éclairer sur la véritable position des lieux que l'on suppose avoir été placés jadis sur le bord de la mer. Nous prendrons pour exemple Aigues-Mortes, où s'embarqua saint Louis, et qui est aujourd'hui loin de la mer. Voici ce que nous trouvons dans une note de M. l'ingénieur Delcros sur le prétendu abaissement de la mer dans cette localité (*Bulletin de la Société de géographie*, 1831). La ville d'Aigues-Mortes a un sol élevé de 30 à 70 centimètres au-dessus de la Méditerranée; il existe, entre elle et le rivage, d'anciennes ruines qui prouvent que le rivage n'a point reculé. Quant au port où s'est embarqué saint Louis, M. Delcros le reconnaît dans l'étang actuel de la ville, qui communiquait avec la mer par des canaux. Si l'on enlevait les sables et la vase qui les ont encombrés depuis six cents ans, les navires pourraient encore s'amarrer aux anneaux en fer que l'on voit à la base des remparts que mouillent les eaux de l'étang, situé encore au niveau de la Méditerranée. Les atterrissements ne donnent donc que des indications incertaines sur les époques auxquelles elles ont commencé.

On a un autre moyen d'arriver à supputer approxi-

mativement l'époque depuis laquelle certaines roches à la surface du globe ont commencé à se décomposer : il consiste à comparer les altérations qui ont eu lieu depuis plusieurs siècles dans des parties de ces roches exposées aux influences atmosphériques, à celles qui se sont opérées dans une masse restée en place; à la vérité, il faut supposer que les causes de décomposition qui existaient alors n'ont pas changé. Cette évaluation est relative seulement à l'époque de l'apparition de ces roches, sans rien préjuger de ses relations avec les derniers soulèvements. Voici, du reste, un exemple qui indiquera la marche à suivre. La cathédrale de Limoges a été construite, il y a environ quatre siècles, avec un granit qui a dû être extrait des carrières les plus rapprochées de la ville. Or, dans l'intérieur de cet édifice, l'altération du granit est peu ou point sensible, surtout dans les parties qui n'ont pas été exposées à l'humidité. Mais il n'en est pas de même au dehors, surtout sur les faces qui sont exposées aux vents de pluie: là, la décomposition et la désagrégation dans quelques parties sont assez profondes; dans d'autres, elles le sont moins. On peut évaluer l'altération moyenne à $7^{mill.}$,88. Or, la portion décomposée de la masse de granit que l'un de nous a observée dans une carrière, à peu de distance de la ville, est de 1^{m},624. En supposant que la marche des altérations ait eu lieu, dans la masse de granit, proportionnellement au temps, on trouve que l'altération a dû commencer il y a 82000 ans. On ignore, il est vrai, la marche de la décomposition du granit en masse, car il est probable qu'elle aura été plus rapide dans les premiers temps que postérieurement, puisque les parties supérieures auront dû préserver celles qui étaient en dessous. Dans ce cas, la loi suivrait une progression décroissante, et donnerait encore un nombre plus considérable.

Les observations précédentes montrent qu'il faut faire remonter très-haut l'époque de l'apparition des granits; celle qui suit concourt encore au même but.

M. Jomard, en explorant les carrières de la Thébaïde, d'où l'on a tiré jadis les colonnes et les pyramides qui sont encore debout au milieu des ruines des temples, a trouvé des masses enlevées avec de grands efforts, portant les empreintes encore fraîches du ciseau qui les a détachées des blocs de granit, et cependant ces traits datent de 3000 ans au moins! On en déduit la conséquence qu'il a fallu un temps considérable pour répandre ce vernis d'un noir luisant sur les rochers, peu éloignés de là, que la main de l'homme n'a pas attaqués.

On a invoqué les monuments historiques pour indiquer l'époque du dernier cataclysme; mais les documents qu'ils peuvent fournir ne sont que des limites inférieures; en effet, l'absence d'ossements humains dans les différents terrains où il existe des fossiles, si ce n'est dans des travertins qui se forment de nos jours, et qui, par conséquent, n'ont pas une origine très-ancienne, montre que l'apparition de l'homme sur la terre est postérieure à cette dernière révolution. En outre, pendant très-longtemps, il dut vivre à l'état sauvage, avant de s'organiser en société, et durant cette longue période aucun monument ne dut être élevé.

On s'est servi également des zodiaques pour remonter à l'époque où les observations astronomiques qui ont servi de base à leur construction ont été faites. Examinons jusqu'à quel point ces témoignages peuvent être accueillis favorablement. Le zodiaque est la zone céleste qui s'étend de 8° à 9° de chaque côté de l'écliptique, dans laquelle s'opèrent les mouvements apparents du soleil, de la lune et des planètes principales. On a divisé cette zone en 12 signes, de chacun 30°, qui forment les douze signes ou constellations du zodiaque; mais, par suite de la non-sphéricité de la terre et de l'attraction du soleil et de la terre, il résulte une inégalité séculaire, à laquelle on a donné le nom de précession des équinoxes, en vertu de laquelle la sphère céleste entière semble avoir un mouvement de rotation très-lent vers l'orient. Cette inégalité a une période de 26000 ans, à la fin de laquelle

le soleil, la terre et les astres se retrouvent dans leurs positions premières; c'est à peu près 1° de rotation angulaire, en 72 ans. On voit donc que les équinoxes n'arrivent pas chaque année lorsque le soleil se trouve au même point du zodiaque, et que les observations des signes ou des constellations dans lesquelles le soleil était situé à une certaine époque peuvent indiquer la date de l'observation.

Sur le plafond du grand temple de Dendérah est représentée une figure qu'entourent les douze constellations, rangées dans un ordre tel, que le lion semble sortir le premier du temple, et le cancer entrer le dernier. On suppose que cette disposition n'est pas l'effet du hasard, et qu'elle a été faite pour indiquer probablement une époque remarquable dans la contemplation du ciel. On a multiplié, dit-on, les emblèmes à côté du cancer pour montrer que le soleil se trouvait au solstice d'été au milieu de ce signe. En interprétant tous les renseignements dus à ces figures, on en a inféré qu'il y a 30 siècles, ou 1000 ans avant notre ère, on voyait au ciel les phénomènes représentés sur ce zodiaque.

A Esné, il existe deux zodiaques plus anciens, et qui remontent à trois ou quatre mille ans avant notre ère, ou, en suivant une autre interprétation, seulement 2400 ans. Un tableau astronomique découvert, par M. Champollion, dans le Rhamesseum de Thèbes, a servi de sujet de recherches à M. Biot, qui a donné à l'antiquité de ce tableau 3285 ans avant l'ère chrétienne. Ces tableaux peuvent être postérieurs, car on a pu sculpter des zodiaques observés depuis longtemps, et qui avaient servi à caractériser des époques remarquables; mais cela ne change pas l'ancienneté de l'observation. M. Testa a avancé que ce monument ne date pas de 300 ans avant l'ère chrétienne.

Dupuis a voulu expliquer l'origine du zodiaque, en supposant que les Égyptiens en soient les inventeurs et que les signes et les dénominations des constellations zodiacales soient en rapport avec les différentes phases de

l'inondation du Nil, phénomène physique qui attirait vivement leur attention. En se livrant à une discussion dont nous ne rapporterons que le résultat, il a fait remonter cette origine à 15000 ans. On a objecté à ce système que les constellations ne représentaient pas les points où le soleil se trouvait à cette époque, mais bien celles qui se levaient le soir et qui restaient la nuit entière dans le ciel, pendant que ces phénomènes avaient lieu; cela ne leur donnerait que 4500 ans d'existence. La divergence des opinions, sur l'interprétation des zodiaques, prouve le peu de confiance que l'on doit attribuer aux déductions chronologiques que l'on en tire; aussi Delambre a-t-il dit, à ce sujet, que ces monuments sont susceptibles de toutes les explications qu'on veut leur donner.

Mais que les zodiaques datent seulement de 2000 ou 3000 ans avant l'ère chrétienne, il n'en est pas moins vrai que, si alors l'Égypte était florissante et les arts cultivés, il avait dû s'écouler bien des années avant que le langage se soit formé, et que les arts et les observations aient atteint un certain degré de perfection! D'un autre côté, les temples et les villes en ruines que l'on a retrouvés lors de la découverte du nouveau monde attestent, comme les ruines de Thèbes et de Ninive, que les peuples des Amériques, ainsi que les anciens Égyptiens, étaient déjà parvenus, il y a plusieurs milliers d'années, à une civilisation avancée. L'exposé que nous venons de présenter montre que les documents recueillis sont insuffisants pour remonter à l'époque du dernier cataclysme qui a donné à l'Europe sa configuration actuelle, et à celle de l'apparition de l'homme sur la terre.

SECTION II.

§ Ier. — *Des climats depuis les temps historiques.*

L'action solaire ne consiste pas seulement à échauffer directement le sol; elle exerce encore une influence sur les vents et sur l'humidité de l'air. Ces causes, réunies au

plus ou moins grand éloignement de la mer, à la hauteur des lieux au-dessus de son niveau, et à d'autres circonstances particulières, dont il a été question en parlant de la température moyenne, constituent les climats.

Avant tout, nous devons examiner si les climats sont actuellement constants dans un même pays, et si, depuis les temps historiques, ils ont éprouvé quelques changements. La température de l'écorce terrestre n'ayant pas varié sensiblement, on doit en inférer que les choses sont dans le même état que jadis; les observations suivantes ne laissent aucun doute à cet égard, et montrent bien que, si dans quelques localités les climats semblent avoir éprouvé des modifications, il faut en attribuer la cause aux changements que l'on a fait subir au sol, ou à des différences dans la culture. Nous empruntons les détails suivants à M. Arago (*Annuaire du bureau des longitudes* 1834):

Du temps de Moïse, dans les environs de la ville de Jéricho, appelée *ville des palmiers*, les dattes mûrissaient, et on les préparait comme fruits secs; la vigne y était également cultivée pour le raisin destiné à faire du vin. A Palerme, qui a une température moyenne supérieure à 17°, on y cultive le dattier, mais le fruit ne mûrit pas; il en est de même à Catane, qui a une température moyenne supérieure de 1° à 2°. A Alger, qui a une température moyenne de 21°, les dattes y mûrissent bien. On doit conclure de là que dans la Palestine, dans les temps bibliques, la température moyenne ne devait pas être inférieure à 21°.

La culture de la vigne nous fournit également quelques données qui peuvent être invoquées. Suivant M. Léopold de Buch, la contrée la plus méridionale où la vigne soit cultivée est l'île de Fer, dans les Canaries, dont la température moyenne est de 21° à 22°. Au Caire, qui possède une température moyenne de 22°, il n'y a pas de vignes, mais seulement des ceps dans les jardins. En Perse, à Abasheer, dont la température moyenne est de 23°, les ceps de vigne doivent être abrités pour fructifier. Tirons de là la conséquence que la tempéra-

ture de la Palestine, du temps de Moïse, ne devait pas aller au delà de 21°,50.

Or, d'après des calculs approximatifs, la température moyenne de Jérusalem étant aujourd'hui un peu supérieure à 21°, il s'ensuit que, depuis plus de 3000 ans, le climat de la Palestine n'a pas éprouvé d'altération sensible. Des considérations semblables, relatives à la culture du blé, conduisent à la même conclusion.

Il n'est pas aussi facile de suivre cette marche pour déterminer la température moyenne des diverses contrées de l'Europe dans les temps anciens, vu le manque de données sur lesquelles on puisse compter. L'exemple suivant montre le peu d'accord existant entre les documents historiques rapportés par les auteurs. Diodore de Sicile dit positivement que, dans les Gaules, les fleuves sont souvent gelés à un point tel, que les chariots les plus pesants peuvent les traverser sur la glace. Quelle induction tirer de là, quand un grand nombre d'attestations prouvent que, depuis l'année 860 jusqu'en 1829, les mêmes fleuves, le Rhin, le Danube, etc., ont été fréquemment gelés? On ne peut donc savoir si le climat s'est détérioré ou non. M. Arago fait observer avec raison qu'une congélation exceptionnelle ne saurait « caractériser un climat; que diverses circonstances peuvent « accidentellement faire descendre sur un point donné « du globe les couches très-refroidies et très-sèches situées dans les hautes régions; que le froid naturel de « ces couches, que le froid résultant de l'abondante évaporation à laquelle leur sécheresse donnerait naissance, ajoutés à celui qui proviendrait, la nuit, du « rayonnement vers l'espace, si l'atmosphère était parfaitement sereine, paraissent suffisants pour occasionner « la congélation des rivières dans toutes les régions du « globe. »

D'après divers rapprochements faits par M. Arago, il paraît que la ligne des Cévennes et diverses contrées n'ont pas changé sensiblement de climat. Il y a cependant des localités, en France, où le climat semble avoir été mo-

difié, en raison de causes que nous avons déjà fait connaître : nous en citerons plusieurs exemples. Dans le Vivarais, les étés étaient jadis plus chauds qu'ils ne le sont aujourd'hui. On sait, en effet, qu'au milieu du XVI[e] siècle, les vignes étaient productives dans des terrains élevés d'environ 600 mètres au-dessus du niveau de la mer, là où maintenant le raisin ne mûrit plus, même dans les meilleures expositions. A Paris, où l'empereur Julien faisait servir sur sa table du vin de Surène, on n'en récolte plus aujourd'hui de potable. Les vins de Beauvais et d'Étampes, qui étaient prisés du temps de Philippe-Auguste, n'ont plus aucune valeur aujourd'hui. La culture de la vigne, à l'époque actuelle, a sa limite septentrionale dans le département de l'Oise.

En Angleterre, on trouve des changements semblables. La vigne y était cultivée dans les temps anciens, et aujourd'hui on n'y fait mûrir qu'avec peine le raisin dans les provinces méridionales, en abritant complétement les ceps contre les vents froids. De là on doit conclure qu'en France et en Angleterre les étés sont moins chauds que jadis.

On doit attribuer le changement de climat des Gaules, d'abord, au déboisage. La plupart des forêts ont été abattues, depuis plusieurs siècles, dans des plaines et sur des montagnes qui sont aujourd'hui dénudées. D'un autre côté, des lacs et des étangs ont été desséchés en grand nombre; les rivières qui débordaient ont été retenues dans leurs lits; des terrains, jadis en friche, sont aujourd'hui couverts de culture. Tous ces changements ont dû modifier le climat de la France. Pour en avoir la preuve, il suffit de suivre les modifications que le climat de l'Amérique a subies à la suite de pareils changements qui se sont opérés de nos jours. Aux États-Unis, le défrichement a rendu les hivers moins froids et les étés moins chauds. Les *maxima* de température de janvier et de juillet tendent donc sans cesse à se rapprocher. Dans le nord de la France, on observe des effets semblables. Voici comment William et Jefferson expliquent

les changements survenus aux États-Unis : l'effet du déboisement a été de rendre les vents d'ouest beaucoup moins fréquents, et de donner la suprématie aux vents d'est, qui s'avancent de plus en plus dans les terres. On conçoit que ces changements aient pu s'opérer sans que, pour cela, la température moyenne ait changé, car il aurait pu y avoir une compensation entre le gain des *minima* et la perte des *maxima*. Il n'en est pas cependant ainsi, attendu que M. Boussingault a reconnu que, dans les observations de température moyenne qu'il a faites sous la zone torride, les plus petits nombres correspondent aux régions boisées. Il semblerait donc, d'après cela, qu'à mesure que le climat devient moins excessif, la température moyenne augmente.

Pour remonter aux causes qui ont fait perdre aux étés, en France et en Angleterre, une partie de leur chaleur, il faut passer successivement en revue celles qui ont pu exercer une influence. Le soleil : on ne peut admettre qu'il ait perdu de sa force, puisque la température n'a pas varié en Palestine depuis 3000 ans. L'extension des glaces du pôle arctique ne saurait non plus être invoquée, d'après M. Arago; il cite, entre autres, ce fait remarquable, que l'immense débâcle de 1813 ou 1814, qui dégagea les côtes du Groënland des blocs de glace qui l'entouraient, n'a exercé dans nos climats aucune influence sur les phénomènes agricoles, et n'a pas produit dans l'atmosphère des modifications appréciables à nos instruments météorologiques.

On ne voit donc, en définitive, que les changements apportés par la culture qui aient pu modifier le climat de la France et des autres contrées.

§ II. — *Des climats à l'époque actuelle.*

Examinons maintenant comment les climats varient, à l'époque actuelle, à la surface du globe, en vertu des causes nombreuses qui concourent à leur production.

Trois éléments principaux caractérisent un climat : 1° la température moyenne de l'année; 2° les variations

qu'éprouve la température des jours, des mois et des saisons; 3° les températures estivale et hibernale.

On distingue sept espèces de climats, classées d'après les zones isothermes dont il a été précédemment question. Voici cette division :

1°	Climat brûlant dans la zone torride, de	27°,5 de température moyenne	à	25°
2°	Climat chaud....... dans la zone de	25° »	à	20°
3°	— doux	de 20	à	15
4°	— tempéré.................	de 15	à	10
5°	— froid	de 10	à	5
6°	— très froid	de 5	à	0
7°	— glacé.....................	au-dessous de zéro.		

Chaque climat ou bien chaque zone isotherme peut être partagée en climats constants, climats variables et climats excessifs. Les climats constants sont ceux qui présentent peu de différence dans le cours de l'année, entre les maxima et les minima de chaleur et de froid; les climats variables, ceux qui offrent, au contraire, des différences assez notables; les climats excessifs, ceux qui en présentent, au contraire, de très-grandes. Voici des exemples de ces trois espèces de climats :

	Nom des localités.	Temp. moy. de l'année.	Temp. moy. du mois le plus chaud.	Temp. moy. du mois le plus froid.	Différence.
Climat constant	Funchal	20°,3	24°,2	17°,2	7°
Climats variables.	Saint-Malo	12 ,3	19 ,4	5 ,4	14
	Paris	10 ,8	18 ,5	2 ,3	16,2
	Londres	10 ,2	18 ,0	3 ,2	15,8
Climats excessifs.	New-York	12 ,1	27 ,1	—3 ,7	30,8
	Pékin	12 ,7	29 ,1	—4 ,1	33,2

Dans la même zone climatérique, les lieux qui la composent, quoique possédant la même température moyenne, ne sont pas cependant également propres au développement des mêmes végétaux et des mêmes animaux; les températures extrêmes exercent, dans ce cas, une grande influence. Quelques degrés de température, en effet, suffisent pour faire mûrir certains fruits, tandis

que quelques degrés de moins gèlent les plantes. En Provence, par exemple, un abaissement de température de plusieurs degrés au-dessous de zéro peut geler les oliviers et les orangers.

Les extrêmes du chaud et du froid, qui sont d'une si grande importance dans la culture, n'ont pas toujours lieu aux mêmes époques de l'année, comme on le voit par les observations suivantes, relatives à Paris (Annuaire du bureau des Longitudes, 1825):

MAXIMUM DE CHALEUR.			MAXIMUM DE FROID.		
Années.	Mois.	Température en degrés centigrades.	Années.	Mois.	Température.
1706..	8 août...	+35°,3	1709..	13 janv....	—23°,1
1753..	7 juillet..	+35,6	1716..	13 id. ...	—18,7
1754..	14 id. ...	+35,0	1754..	8 id. ...	—14,1
1755..	14 id. ...	+34,7	1755..	8 id. ...	—15,1
1793..	8 id. ...	+38,4	1768..	8 id. ...	—17,1
1793..	16 id. ...	+37,3	1776..	29 id. ...	—19,1
1800..	18 août...	+35,5	1783..	30 déc. ...	—19,1
1802..	8 id. ...	+36,4	1788..	31 id. ...	—22,3
1803..	8 id. ...	+36,7	1795..	25 janv....	—23,5
1808..	15 juill....	+36,2	1798..	26 déc. ...	—17,6
1818..	24 id....	+34,5	1823..	14 janv....	—14,5

Pendant les hivers excessifs de 1789, 1788 et 1795, les noyers et beaucoup d'autres arbres furent gelés. On voit par là à quelle vicissitude l'agriculture est exposée dans les climats variables.

Les mers, en raison de leur surface homogène, interviennent d'une manière uniforme, comme le démontrent aussi les inflexions des lignes isothermes qui les traversent (*voyez* planche V), inflexions plus régulières et moins étendues que sur terre. Quant aux continents, leurs contours exercent une grande influence; de là, l'obligation où l'on est de déterminer le rapport entre leur superficie et leurs contours. A toutes les méthodes employées jusqu'ici pour cette détermination, M. de Humboldt donne la préférence à celle de M. Nagel, qui est parti de l'hypothèse que, si tous les continents étaient circulaires, ils auraient le minimum de contours. Il a

comparé ensuite l'étendue réelle du littoral ou le périmètre réel à l'étendue hypothétique prise pour unité, ou à la circonférence que l'on obtiendrait en supposant les continents ramenés à une figure circulaire.

M. Nagel a établi, par ce moyen, que la différence entre les deux quantités est d'autant plus grande que le continent est plus sinueux : ce qui, du reste, était facile à prévoir. Voici les rapports auxquels il est parvenu :

Europe	1 : 3,03
Asie	1 : 2,41
Afrique	1 : 1,35
Nouvelle-Hollande	1 : 1,44
Amérique du Sud	1 : 1,69
Amérique du Nord	1 : 2,89

L'Afrique, eu égard à sa superficie, est donc la partie continentale qui a le moins de développement de côtes; viennent ensuite et successivement la Nouvelle-Hollande, l'Amérique du Sud, l'Asie, et l'Amérique du Nord.

Les inflexions que nous présentent les lignes isothermes dans le voisinage de la Méditerranée, de la mer Rouge, du golfe Persique, etc., indiquent que la configuration des côtes semble exercer une influence sur les climats; influence qui tient, comme on va le voir, à ce que le voisinage d'une mer rend les étés moins chauds et les hivers moins froids; c'est ce motif qui a fait établir trois espèces de climats : climats des îles, des côtes et des continents; climats qui peuvent réellement être ramenés à deux : *climats marins* et *climats continentaux*.

Les éléments des climats marins sont, sans aucun doute, la grande capacité calorifique de l'eau, la quantité de chaleur latente qui devient libre lorsque la vapeur d'eau passe à l'état liquide, et réciproquement celle qui est absorbée quand l'eau prend l'état gazeux. Ces éléments qui tendent à rendre les climats plus constants ne jouent plus un rôle aussi important en s'éloignant des côtes, attendu que la différence entre les tempé-

ratures estivales et hibernales, augmente dans le même rapport, comme le prouvent les résultats suivants, que nous empruntons à M. Kaemtz (*Éléments de météorologie*, p. 170):

MOYENNES ESTIVALES ET HIBERNALES DANS LES ILES BRITANNIQUES.

Lieux.	Hiver.	Été.	Différence.
Féroé	3°,90	11°,60	6°,70
Ile Unst (Shetland)	4,05	11,92	7,87
Ile de Man	5,59	15,08	9,49
Édimbourg	3,47	14,07	10,60
Aberdeen	3,39	14,57	11,18
Kinfaum-Castle	2,94	14,17	11,23
Londres	3,22	16,75	13,53
Lancaster	3,58	15,32	11,74
Kendal	2,03	14,32	12,29
Penzance	7,04	15,83	8,79
Helston	6,19	16,00	8,81

Ces résultats montrent que la température moyenne de l'hiver de tous ces lieux est supérieure à zéro, même pour les Shetland et les Féroé, qui se trouvent sous des latitudes élevées (62°); que Londres, Lancaster, etc., ont les plus grandes différences. Le vent du sud-ouest, qui souffle très-fréquemment en hiver dans ces contrées, sert à expliquer l'état climatérique de l'Angleterre. Ce vent, en effet, transporte avec lui l'air chaud et humide de l'Océan; les vapeurs, en se condensant, abandonnent de la chaleur latente, et s'opposent ainsi au refroidissement du sol, ce qui rend les hivers doux. En été, la même cause produit un effet contraire, puisque les vapeurs qui se précipitent s'opposent au rayonnement solaire : aussi la température est-elle moins élevée.

Si l'on s'avance sur le continent, dans l'intérieur des terres, pour connaître leur influence, on trouve :

Lieux.	Hiver.	Été.	Différence.
	°	°	°
Amsterdam	2,67	18,79	16,12
Middelbourg	1,92	16,92	15,00
Maëstricht	2,84	18,12	15,28

Lieux.	Hiver.	Été.	Différence.
	°	°	°
Bruxelles.........	2,56....	19,01....	16,45
Franecker........	2,56....	19,57....	17,01
La Haye.........	2,46....	18,63....	15,17
Saint-Malo........	5,67....	18,90....	15,23
Dunkerque.......	3,56....	17,68....	14,22
La Rochelle......	4,78....	19,22....	14,44
Paris.............	3,59....	18,01....	14,42
Montmorency.....	3,21....	18,96....	15,75

La température moyenne hibernale de tous ces lieux est environ de 3°, comme celle des villes d'Angleterre précédemment mentionnées, à deux exceptions près, tandis que la moyenne estivale, s'élevant à près de 18°, est plus élevée. Cette différence est due au vent d'est sec, qui enlève les vapeurs aqueuses. Avançons de nouveau dans le continent :

Lieux.	Hiver.	Été.	Différence.
Dantzig........	—1°,11....	16°,62....	17°,83
Baireuth.......	—1,20....	16,03....	17,23
Berlin.........	—1,01....	17,18....	18,19
Augsbourg.....	—1,08....	16,80....	17,88
Apenrade......	0,73....	16,21....	15,48
Dresde.........	—1,20....	17,21....	18,41
Cuxhaven......	0,51....	16,76....	16,25
Tubingue......	—0,02....	17,01....	17,03
Sagan........	—2,65....	18,20....	20,85
Munich.......	0,12....	17,96....	17,84
Ratisbonne.....	—1,93....	19,68....	21,61
Hambourg.....	0,40....	18,96....	18,56
Lunebourg.....	0,95....	17,25....	16,30
Prague........	—0,44....	19,93....	20,37
Vienne........	0,18....	20,36....	28,18

Ces résultats montrent bien l'influence des continents sur la température moyenne; car Cuxhaven, Lunebourg et Apenrade, quoique placés sous des latitudes élevées, ont néanmoins encore une température supérieure à zéro, en raison des influences combinées du voisinage de la mer et du continent.

Éloignons-nous encore de l'Atlantique:

Lieux.	Hiver.	Été.	Différence.
Pétersbourg......	— 8°,70....	15°,96....	23°,66
Abo............	— 5,79....	16,14....	21,91
Moscou.........	—10,22....	17,55....	27,77
Kasan..........	—13,66....	17,35....	31,11
Barnaul.........	—14,11....	16,57....	30,68
Slatoust........	—16,49....	16,08....	32,57
Irkutzk.........	—18,88....	16,00....	33,88
Jakouzk.........	—38,90....	17,20....	56,10

Nous trouvons encore ici la preuve que plus on s'avance dans les terres, plus les hivers deviennent froids et plus la différence entre les températures estivale et hibernale est grande. A latitude à peu près égale en Angleterre et en Russie, la température moyenne est bien différente. Un ciel sans nuages dans les régions éloignées de l'Atlantique, comme la Russie, refroidit le sol pendant l'hiver et l'échauffe pendant l'été. Aussi les étés y sont-ils plus chauds qu'en Angleterre. Les exemples que nous venons de citer suffisent pour montrer l'influence des côtes et des continents sur les températures hibernale et estivale, et, par suite, sur les climats.

On a vu précédemment que la température moyenne d'un lieu variait, non-seulement avec la hauteur de ce lieu au-dessus du niveau de la mer, mais encore avec la latitude, abstraction faite de l'influence exercée par de nombreuses causes locales. Nous avons dit également qu'entre les parallèles de 45° et de 55°, pour 1° de latitude il y avait un changement de température moyenne annuelle égal à 0°,62. Mais ce rapport, comme l'observe M. de Humboldt, est indépendant des causes perturbatrices que les résultats suivants mettent en évidence :

Lieux.	Temp. moyenne.	Latitude.
Paris.............	10°,8....	48°50′
Londres...........	10,4....	51 31
Maëstricht.........	10,1....	50 51
Harlem............	10,0....	50 51
Dublin............	9,5....	53 23
Manchester........	8,7....	53 29
Édimbourg........	8,6....	55 57

Nous voyons que Paris et Édimbourg, qui diffèrent de 7°7′ en latitude, ne présentent qu'une différence de 2°,2 dans leur température moyenne au lieu de 4°,2 que donne le calcul. Cela tient à ce qu'une péninsule, à égalité de vents prépondérants, a toujours un climat plus tempéré que l'intérieur des grandes masses de terre.

M. de Humboldt, dans le passage suivant, a parfaitement mis en évidence cette différence entre les climats marins et continentaux (*Asie centrale*, t. III, p. 147) :

« Dans le N.-E. de l'Irlande, *sur les côtes de Gle-« narm* (lat., 54° 56′), situées sous le parallèle de Kö-« nigsberg, en Prusse, le myrte végète avec la même force « qu'en Portugal (*Irish transactions*, t. VIII, p. 116, « 203 et 269). *Il y gèle à peine en hiver*, et cependant « les chaleurs de l'été ne suffisent pas pour mûrir le « raisin. Le mois d'août, qui dans l'est de l'Europe, par « exemple en Hongrie, est de 21°, n'atteint à Dublin (sur « la même bande isotherme de 9° ½ à 10°) que 16°. Au « contraire, le mois de janvier, qui en Hongrie est de « —2°, et encore en Lombardie, sur la bande isotherme « de Padoue, Pavie et Milan (12°,5 à 12°,8) à peine au-« dessus de + 1°, atteint en Irlande, à Dublin (par une « température annuelle de 9°,5), + 4°,3. Les mares et « les petits lacs des îles Féroé ne se couvrent pas de glace « pendant l'hiver, malgré leur latitude de 62°. Selon les « observations de MM. Kuhn et Trevelyan, les tempéra-« tures moyennes hivernales y sont + 4°,3, et les esti-« vales à peine 12° ou 13°. » (Jameson, *ed. Phys. Journal*, n° 18, p. 154, et Mahlman, *in Repert. der physik*, t. IV, p. 35.)

En Angleterre, sur les côtes du Devonshire, les myrtes, les camellia japonica, passent l'hiver sans abri, en pleine terre. On y a même vu des orangers en espalier à peine abrités et rapportant des fruits.

Sur la côte méridionale de l'Angleterre, Penzance, Plymouth et Gosport ont les hivers les plus tempérés.

La température moyenne de l'hiver est de + 5° à + 6°,8, quoique la température moyenne de l'année ne soit que de 11° à 11°,2, par conséquent de 0°,6 supérieure à celle de Londres. La moyenne des hivers de Florence et de Montpellier diffère très-peu. Ces exemples suffisent pour montrer l'influence du voisinage de la mer pour rendre les climats moins excessifs. On voit par là que la partie méridionale et moyenne de l'Europe doit la douceur de son climat, non-seulement à des côtes très-articulées, à l'Océan qui la baigne, à des mers libres de glace, mais encore au voisinage de l'Afrique, où se produisent d'immenses courants d'air chaud dont nous ressentons les effets, tandis qu'en Asie, au sud, il n'existe que des mers qui ne se comportent pas de même que les continents placés dans le voisinage des tropiques.

Voilà ce qui a lieu quand la mer est calme; mais si elle est traversée dans diverses directions par des courants qui distribuent inégalement la chaleur des mers, les effets deviennent plus complexes. C'est en s'appuyant sur ces courants que l'on peut expliquer la température douce des climats des côtes occidentales de l'Europe, et les divers effets climatériques que l'on observe sur les côtes orientales de l'Amérique, dont il sera question en parlant des grands courants marins.

Dans l'étude des climats, il faut encore avoir égard, comme le pense M. de Humboldt, à l'influence des terres tropicales placées sous les mêmes méridiens; sous l'équateur, par exemple, il n'y a que $\frac{1}{6}$ qui ne soit pas recouvert d'eau. Dans l'hypothèse d'Halley sur la cause des vents alizés, cette grande masse liquide, jointe à la distribution des terres par différents degrés de longitude sur la zone équatoriale, réagit sur les courants d'air ascendants que l'on suppose être transportés sur la zone tempérée à mesure qu'ils se refroidissent dans leurs courses horizontales.

La distribution des terres sous les tropiques a été établie comme il suit par M. de Humboldt :

Pour l'Afrique...........	461
— l'Amérique	301
— la Nouvelle-Hollande et l'archipel des Indes.	124
— l'Asie	114
	1000

Cette distribution est importante à connaître pour l'appréciation des températures dans les zones tempérées, suivant les différents méridiens. Un grand nombre d'observations de température moyenne, faites dans les régions équatoriales, prouvent que la surface du sol près de la mer est de 27°,5, tandis que loin des côtes, en pleine mer, elle est de 25°,5. On voit dès lors quelle influence une plus grande étendue de terre, sous l'équateur, doit exercer sur le climat d'un continent dont cette terre fait partie.

Si nous considérons maintenant la distribution de chaleur totale des portions de l'atmosphère situées au-dessus d'un continent et de l'Océan, aux diverses époques du jour et de l'année, la différence est encore plus grande, et vient à l'appui de l'influence exercée par les terres et les mers tropicales sur nos continents.

Le prolongement des terres vers les pôles doit intervenir sur la distribution de la chaleur, de même que le rapport des terres et des mers sous les tropiques, puisque ce prolongement, comme on l'a vu précédemment, tend à diminuer le froid des régions polaires.

M. de Humboldt fait à ce sujet les réflexions suivantes (*Asie centrale*, t. III, p. 178), que nous rapporterons textuellement :

« Au nord du détroit de Behring, la ceinture de glace « polaire est limitée (*Beechey*, t. I, p. 537 et 551, et « t. II, p. 509) en été par une ligne sinueuse, dirigée « du S.-O. au-N. E.; elle se maintient, selon la tempéra- « ture de l'année, tantôt dans le parallèle du cap Smyth, « tantôt dans celui du cap Collie (lat. 70° $\frac{1}{2}$ à 71° $\frac{1}{4}$), « passant du continent de l'Amérique à celui de l'Asie.

« Aussi le froid de ces contrées est-il si intense que, même « dans les mois de juillet et d'août de l'année 1827, l'expédi- « tion du Blossom y a trouvé, par les vents du N. et N.-O. « (malgré l'influence d'un courant du S.-O. qui amène « des eaux de 5°,4 à 6°,6), une température moyenne « de l'atmosphère qui s'élevait à peine à 4° ½. Les varia- « tions étaient de 0° à 8°. Sur le même parallèle, en « Laponie, au cap Nord de l'île Mageræ, dans des ré- « gions qui cependant se trouvent aussi enveloppées en « été de ces brumes qui entravent l'action du soleil, la « chaleur moyenne de juillet est encore de 8°. Plus loin « des côtes, à Alten (lat. 71°), M. Léopold de Buch l'a « trouvée de 17°,5!

« Dans l'hémisphère austral, les extrémités pyrami- « dales des continents qui se prolongent inégalement vers « le pôle Sud offrent le climat des îles. Des étés d'une « température très-basse sont suivis, au moins jus- « qu'aux 48° et 50° de latitude, d'hivers peu rigou- « reux; d'où il résulte que les formes végétales de la « zone torride, les fougères en arbre et de belles orchi- « dées parasites, peuvent avancer au sud, jusque vers « les 38° et 46° de latitude australe; tandis que, dans « l'hémisphère boréal, les fougères en arbre et les or- « chidées ne dépassent pas le tropique du Cancer.... »

La surface des terres des deux hémisphères suit le rapport de 3 à 1; les différences portent beaucoup plus sur les terres qui se trouvent dans les zones tempérées que sur celles situées sous la zone torride. Les premières sont, dans les hémisphères boréal et austral, comme 13 à 1; les secondes, comme 5 à 4. Cette distribution inégale des terres ne peut manquer d'exercer de l'influence sur la température de l'hémisphère austral.

SECTION III.

DES DIFFÉRENTS SOLS.

§ I. — *Considérations générales sur les pouvoirs absorbants, émissifs et rayonnants.*

Avant de faire connaître comment la nature du sol

influe sur les climats, nous devons rappeler quelques-unes des propriétés générales de la chaleur, qui jouent le principal rôle dans cette circonstance.

Le soleil lance de toutes parts, autour de lui, de la chaleur rayonnante, qui est absorbée, ou réfléchie en plus ou moins grande proportion, par les corps qui se trouvent sur son passage. La faculté que possède une substance d'émettre ainsi de la chaleur rayonnante est appelée pouvoir émissif, pouvoir rayonnant, et celle qu'elle a d'absorber la chaleur, pouvoir absorbant. Le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant sont égaux pour un même corps, quoique variant ensemble avec la température de la source calorifique. La propriété que les corps possèdent de réfléchir les rayons calorifiques est le pouvoir réfléchissant ou réflecteur, qui est complémentaire des deux premiers; en effet, lorsque la chaleur rayonnante émanée d'une source calorifique tombe sur un corps, une portion est réfléchie, régulièrement ou irrégulièrement, sans être absorbée, parce qu'elle est renvoyée par la surface de ce corps; or, comme toute la chaleur émise est absorbée ou réfléchie, il faut que les deux pouvoirs absorbant et réflecteur soient complémentaires l'un de l'autre.

Le tableau suivant (d'après M. Melloni) donne une idée du pouvoir émissif de certains corps à la température de 100° :

Noir de fumée......	100	Encre de Chine.....	85
Carbonate de plomb.	100	Glace.............	85
Papier à écrire.....	98	Gomme laque......	72
Verre ordinaire.....	90	Surface métallique..	12

On voit par ces résultats que les surfaces métalliques n'absorbent que les $\frac{12}{100}$ de la chaleur incidente, et réfléchissent les $\frac{88}{100}$.

En général, les surfaces noires, rugueuses, ont le plus grand pouvoir absorbant, et les surfaces blanches et polies le plus grand pouvoir réfléchissant.

D'un autre côté, les corps transparents absorbent en plus ou moins grande proportion la chaleur rayonnante

qui les traverse; cette faculté a été appelée diathermanéité. Le sel gemme est très-diathermane, pour toutes les sources de diverse température, tandis que l'alun l'est très-peu, et d'autant moins que la température de la source est plus basse.

La surface du sol agit suivant sa nature et celle des plantes qui le recouvrent, c'est-à-dire suivant leurs pouvoirs absorbants, émissifs et réflecteurs. Il existe effectivement, comme l'observe M. de Humboldt (*Asie centrale*, t. III, p. 191 et suivantes), une grande différence, toutes choses égales d'ailleurs, entre les déserts, les savanes couvertes de gazon, les steppes recouverts de grandes herbes légumineuses, les forêts, les marécages et les pays cultivés. Les déserts de sable ou couverts de roches ne se trouvent presque exclusivement que dans la partie chaude de l'ancien continent; les savanes en Amérique, les steppes dans la Russie méridionale, la Sibérie et le Turkestan. Les déserts de sable occupent environ 132° en longitude, depuis l'extrémité occidentale du Sahara jusqu'à l'extrémité orientale du Gobi, à travers le centre de l'Afrique, l'Arabie, la Perse, le Caudahar, le Thian-chan-nan-lou et le pays des Mogols. Plus des deux tiers de cette vaste superficie, nus et arides, sont situés à l'ouest de l'Indus, très-près des tropiques où le sable acquiert, sous l'influence solaire, une température de 50° ou 60°. Une continuité de sol ainsi échauffé doit exercer nécessairement une influence sur la température d'une grande portion de la terre.

Lorsque la température s'abaisse suffisamment par suite du rayonnement céleste, l'herbe se recouvre alors d'une abondante rosée. C'est à cette cause qu'est due la puissante végétation des llanos de l'Amérique équatoriale. Il existe une grande différence, sous ce rapport, dans les effets produits sur le sol par les graminées et les arbres des forêts. Les arbres refroidissent les couches d'air qui enveloppent leur cime, lesquelles couches descendent vers le sol, qui ne participe point au rayonnement, à cause des branches servant d'abri. Les grami-

nées, au contraire, restent constamment plongées dans l'atmosphère refroidie, et doivent se couvrir de rosée.

Sous la zone tempérée, M. Daniell a constaté que le rayonnement nocturne, dans les prairies et les bruyères, peut abaisser la température pendant dix mois jusqu'à zéro.

Quant aux forêts, elles agissent, dans cette circonstance, de trois manières : 1° elles abritent le sol contre l'irradiation solaire; 2° elles produisent, par la transpiration cutanée des feuilles, une forte évaporation ; 3° elles présentent au refroidissement nocturne de grandes surfaces. On conçoit, d'après cela, combien il est important, dans l'étude d'un climat, de prendre en considération le rapport des surfaces boisées aux surfaces dénudées, couvertes de graminées, d'herbes, ou de différentes espèces de culture.

L'absence de forêts dans une localité doit augmenter nécessairement la température et la sécheresse de l'air, d'où résulte une diminution dans l'étendue des nappes d'eau, ainsi que dans la végétation.

Quand le sol des forêts est marécageux, l'abri des arbres s'oppose à l'action solaire, et devient nuisible au climat. Ces marais gèlent profondément, et forment ainsi de petits glaciers, qui résistent longtemps à l'action de la chaleur rayonnante.

§ II. — *Des différents sols et de leurs propriétés physiques.*

Le sol agit sur la végétation de diverses manières, soit en servant de support aux plantes par l'intermédiaire des racines, soit en raison de sa composition et de ses propriétés physiques et chimiques. Il se compose : 1° de ses éléments minéralogiques ; 2° de l'humus formé de détritus de matières animales ou végétales plus ou moins solubles dans l'eau, et servant à la nutrition des plantes.

Les éléments minéralogiques proviennent de la décomposition des roches ; dès lors le premier sol formé l'a été aux dépens des roches ignées, le granit, le mica-

schiste, la syénite, le trachyte, etc.; les sols qui sont venus ensuite l'ont été aux dépens de terrains de sédiment.

Les roches primitives, en se décomposant sous l'influence des actions météoriques, produisent des galets, du sable, de l'argile, etc. L'eau s'infiltre d'abord dans ces roches par l'intermédiaire des fissures; en se congelant, elle augmente de volume, dilate les parties, et finit à la longue par faire éclater les masses, dont les débris, emportés par les cours d'eau, forment, sur leurs bords et à leurs embouchures, des alluvions ou des atterrissements qui ne tardent pas à se couvrir de végétations. Indépendamment de cette décomposition mécanique, le feldspath, l'amphibole, le mica, le protoxyde de fer, principes constituants de ces roches, en éprouvent une autre due à la réaction des agents météoriques sur ces substances. Nous reviendrons plus en détail, dans un chapitre à part, sur ces décompositions.

Le feldspath et le mica deviennent terreux, friables, et se changent en une matière argileuse appelée kaolin (1).

L'amphibole et le pyroxène éprouvent une altération du même genre par la suroxydation du fer. Les calcaires, roches peu dures, sont facilement attaqués par les causes mécaniques, et sont dissous par les eaux chargées d'acide carbonique.

Lorsque la végétation se développe dans les dépôts formés de cailloux, de sable et d'argile provenant de la désagrégation et de la décomposition des roches, on aperçoit d'abord des plantes qui prennent peu au sol, beaucoup à l'atmosphère, et qui n'exigent qu'un point d'appui; c'est ainsi que se développent, sous les basses latitudes, les cactus et autres plantes grasses, les mimosa, etc.

Dans nos climats, on voit paraître successivement des lichens, des mousses, des fougères, etc., dont les débris, s'accumulant d'année en année, finissent par former un terrain propre à la culture.

(1) La presque totalité de la potasse ou de la soude est enlevée, ainsi qu'une certaine proportion de silice, et les eaux dissolvent un silicate de potasse.

A l'époque où une grande partie de la surface terrestre était sous les eaux, la végétation consistait seulement en plantes marines. La mer, en effet, offre aux plantes tous les éléments dont elles ont besoin, savoir, l'acide carbonique, les matières ammoniacales, les phosphates, les carbonates alcalins ; la terre ne fournit pas aux plantes tout ce qui leur est nécessaire, il leur faut encore le concours de l'atmosphère : l'une fournit les éléments qui manquent à l'autre, et réciproquement.

La présence des phosphates, quoiqu'en très-petite proportion, dans le sol, doit être considérée néanmoins comme un principe essentiel. On a observé effectivement, en Angleterre, que des champs qui ne renfermaient plus sensiblement de phosphate doublaient de fertilité en y semant des débris d'ossements. Les phosphates et les sels terreux sont nécessaires pour la production de la fibrine et de la caséine végétale.

Pour donner une idée de la manière dont la végétation s'empare d'une contrée, nous emprunterons l'exemple suivant à M. Gaudichaud (Voyage autour du monde de *l'Uranie ; Botanique*, page 88), qui montre comment, à Owhyhée, l'une des îles Sandwich, la végétation se développe sur des roches qui résistent le plus à l'action des agents atmosphériques. La lave dont se compose l'île est vitrifiée, brillante près du rivage ; à 300 mètres au delà, elle est encore dure, mais opaque et rugueuse, ce qui annonce déjà un commencement d'altération ; à une hauteur de 5 à 600 mètres, l'action simultanée de la chaleur et des nuages qui humectent constamment cette partie de la montagne, décompose cette lave ; là commence seulement la végétation de l'île, qui est bien différente et plus active que celle que l'on observe sur plusieurs points isolés du rivage, où arrivent des filets d'eau qui descendent des montagnes et entraînent dans leur cours de la terre végétale. M. Gaudichaud n'a pu franchir les nuages, qui se trouvent à une hauteur de 600 à 1200 mètres. Il pense qu'à cette hauteur les plantes alpines sont moins nombreuses et moins vigoureuses, et

qu'au-dessus, vers le sommet, la lave est intacte comme à la base.

Les terrains provenant de la décomposition des roches, et qui ont été envahis par la végétation, renferment comme principes constituants, indépendamment des matières organiques, de la silice, de l'alumine, de la chaux, de la magnésie, de la potasse ou soude, des oxydes de fer ou de manganèse, de l'eau et quelquefois de l'acide fluorhydrique.

En comparant l'analyse des minéraux élémentaires à celle des cendres des végétaux, on voit sur-le-champ que ceux-ci ont pris au sol les substances inorganiques, à l'exception toutefois des phosphates, qui ne sont pas fournis par les détritus des terrains cristallisés. Suivant M. Boussingault, auquel nous empruntons ces détails (*Économie rurale considérée dans ses rapports avec la chimie, la physique, la météorologie,* t. I), on regarde l'apparition de cette substance comme peut-être contemporaine de celle des animaux sur la terre.

Ce préambule était nécessaire afin de pouvoir expliquer les propriétés physiques que possèdent les terres propres à la végétation.

Une terre végétale doit être assez meuble pour que les racines puissent y pénétrer et s'y étendre, et que l'eau s'y infiltre sans y séjourner. L'air doit y entrer, s'y renouveler facilement, sans toutefois dessécher le sol. On conçoit dès lors que la qualité de cette espèce de terre doit dépendre des proportions de sable et d'argile. Le sable rend le sol plus meuble, par conséquent plus perméable à l'eau et à l'air. Ses qualités dépendent encore du degré de finesse de ses grains.

L'argile agit d'une manière opposée; aussi aucune culture n'est fructueuse dans un terrain entièrement argileux. Indépendamment de ces deux principes, la terre végétale renferme, comme nous l'avons déjà dit, différentes substances salines, indépendamment de l'humus.

Nous donnons, d'après M. Schübler (*Annales de l'a-*

griculture française, t. XL, p. 122, 2e série), les substances minérales que l'on trouve habituellement dans le sol :

1° Sable siliceux.
2° Sable calcaire.
3° Argile maigre, renfermant.... 0,40 de sable.
4° Argile grasse.............. 0,24 —
5° Terre argileuse............. 0,11 —
6° Argile à peu près pure.
7° Carbonate de chaux pulvérulent ou à différents états de ténuité.
8° L'humus.
9° Le gypse.

Terre de jardin légère, noire, friable, fertile, contenant pour 100 :

Argile.....................	52,4
Sable quartzeux.............	36,5
Sable calcaire..............	1,8
Terre calcaire..............	2,0
Humus......................	7,3

Terre labourable prise dans un champ d'Hoffwyll, composée de :

Argile.....................	51,2
Sable siliceux..............	42,7
Sable calcaire..............	0,4
Terre calcaire..............	2,3
Humus......................	3,4

Terre labourable prise dans un vallon situé dans le voisinage du Jura, contenant :

Argile.....................	33,3
Sable siliceux..............	63,0
Sable calcaire..............	1,2
Terre calcaire et humus........	1,2
Perte......................	1,3

Les propriétés physiques qui influent sur les qualités des terres arables sont : 1° la pesanteur spécifique ; 2° la

faculté de retenir l'eau; 3° la consistance; 4° l'aptitude à la dessiccation; 5° le pouvoir hygroscopique; 6° l'absorption de l'oxygène de l'air; 7° la faculté conductrice par la chaleur; 8° l'échauffement par la chaleur solaire, ou le pouvoir absorbant.

M. Schübler a déterminé les propriétés physiques de chacune des terres dont nous venons de donner la composition.

1° *De la densité.* Elle a été obtenue en comparant le poids des terres, sous le même volume, à l'état pulvérulent sec ou humide.

RÉSULTAT DES EXPÉRIENCES SUR LA DENSITÉ DES TERRES.

DÉSIGNATION DES TERRES.	PESANTEUR SPÉCIFIQUE, l'eau = 1.	POIDS DU LITRE de terre comprimée.	
		Sèche.	Humide.
		KILOG.	KILOG.
Sable calcaire	2,822	2,085	2,605
Sable siliceux	2,753	2,044	2,494
Gypse	2,358	1,676	2,350
Argile maigre	2,701	1,799	2,386
Argile grasse	2,652	1,621	2,194
Argile pure	2,591	1,376	2,126
Terre calcaire fine, carbonate de chaux	2,468	1,006	1,758
Humus	1,225	0,632	1,428
Terre de jardin	2,332	1,499	1,744
Terre arable d'Hoffwyll	2,401	1,537	2,180
Terre arable du Jura	2,526	1,731	2,126

Ces résultats montrent, 1° que les sables calcaires et siliceux sont les plus denses des matières minérales composant la terre arable; 2° que l'argile est celle qui a la moindre densité; 3° que l'humus en a une qui est encore moindre; on peut donc, connaissant la densité d'un

terrain, en conclure approximativement la nature de ses principaux éléments constituants.

2° *De l'imbibition.* Cette propriété est celle en vertu de laquelle les terres retiennent l'eau en s'opposant à une évaporation trop rapide. On l'évalue en pesant une terre desséchée à 40° ou 50°, jusqu'à ce qu'elle ne perde plus de poids par une dessiccation prolongée, et l'on pèse de nouveau après lui avoir fait absorber toute la quantité d'eau qu'elle peut prendre. Le tableau suivant renferme les résultats obtenus.

DÉSIGNATION DES TERRES.	EAU ABSORBÉE par 100 parties de terre.	UN LITRE DE TERRE mouillée contient	
		Eau.	Terre.
		KILOG.	KILOG.
Sable siliceux	25	0,499	1,995
Gypse (à l'état hydraté)	27	0,501	1,855
Sable calcaire	29	0,582	2,021
Argile maigre	40	0,682	1,654
Argile grasse	50	0,730	1,464
Argile pure	70	0,875	1,251
Terre calcaire fine	85	0,808	0,950
Humus	190	0,935	0,493
Terre de jardin	89	0,821	0,923
Terre arable d'Hoffwyll	52	0,745	1,435
Terre arable du Jura	48	0,689	1,437

Nous voyons, par ces résultats, que les sables siliceux et calcaires, ainsi que le gypse, sont les substances qui ont le moins d'affinité pour l'eau; que l'argile en retient davantage, et d'autant moins qu'elle renferme plus de silice. Il est à remarquer que le calcaire en poudre fine en absorbe 85, tandis qu'à l'état de sable il n'en prend que 29 pour 100. On voit par là combien l'état de division influe sur les propriétés physiques d'un sol.

L'humus étant la substance qui a le plus grand pouvoir absorbant, on conçoit comment les terres végétales

riches en humus conservent longtemps l'eau dont elles sont humectées.

3° *Ténacité, cohésion, adhérence des terres.*—Pour déterminer ces facultés, M. Schübler a moulé les différentes substances humectées convenablement en parallélipipèdes égaux et semblables; puis, quand ils ont été complétement secs, il les a posés, par leurs extrémités, sur deux supports fixes, et au moyen de plateaux de balance suspendus exactement au milieu de la longueur des prismes, il les a chargés successivement de poids jusqu'à ce qu'il y eût rupture : la charge supportée par chaque parallélipipède, immédiatement avant qu'elle eût lieu, servait de mesure à la ténacité.

RÉSULTATS OBTENUS DANS DEUX SÉRIES D'EXPÉRIENCES.

DÉSIGNATION des terres.	TÉNACITÉ de la terre sèche, celle de l'argile étant 100.	TÉNACITÉ exprimée en poids.	COHÉSION A L'ÉTAT HUMIDE, adhérence verticale au fer et au bois, sur 1 décimètre carré.	
			FER.	BOIS.
		KILOG.	KILOG.	KILOG.
Sable siliceux. . .	0,0	0, 0	0,17	0,19
Sable calcaire. . .	0,0	0, 0	0,19	0,20
Terre calcaire fine.	5,0	0,55	0,65	0,71
Gypse..	7,3	0,81	0,49	0,53
Humus.	8,7	0,97	0,40	0,42
Argile maigre. . .	57,3	6,36	0,35	0,40
Argile grasse. . . .	68,8	7,64	0,48	0,52
Terre argileuse. . .	83,3	9,25	0,78	0,86
Argile pure. . . .	100,0	11,10	1,22	1,32
Terre de jardin. . .	7,6	0,84	0,29	0,34
Terre d'Hoffwyll. .	33,0	3,66	0,26	0,28
Terre du Jura. . .	22,0	2,44	0,24	0,27

Ces résultats nous montrent que la ténacité d'un sol humide n'est pas en raison directe avec la facilité d'imbibition, puisque l'humus et la terre calcaire, qui absorbent plus d'eau que l'argile, ont moins de ténacité.

4° *Aptitude du sol à la dessiccation.*—Cette propriété intéresse vivement les agriculteurs, puisqu'une trop prompte dessiccation tue la végétation. Elle a été déterminée au moyen de pesées faites à différents intervalles de temps.

DÉSIGNATION DES TERRES.	100 PARTIES D'EAU DE LA TERRE perdent, en 4 heures et à 18°,75 de températ.:
Sable siliceux.	88,4
Sable calcaire.	75,9
Gypse.	71,7
Argile maigre.	52,0
Argile grasse.	45,7
Terre argileuse.	34,9
Argile pure.	31,9
Calcaire en poudre fine.	28,0
Humus.	20,5
Terre de jardin.	24,3
Terre arable d'Hoffwyll.	32,0
Terre arable du Jura.	40,1

Le sable et le gypse sont donc les substances qui laissent échapper le plus facilement l'eau. Nous retrouvons encore ici une grande différence entre les effets obtenus avec le sable calcaire et le calcaire dans un grand état de division.

Quant au retrait qu'éprouvent certaines substances en se desséchant, et d'où résultent des crevasses, il a été évalué en mesurant des prismes de terres humides avant et après leur dessiccation.

DÉSIGNATION DES TERRES.	1000 PARTIES CUBES SE RÉDUISENT A :
Chaux carbonatée en poudre fine.	950
Argile maigre.	940
Argile grasse.	911
Terre argileuse.	886
Argile pure.	817
Humus.	846
Terre de jardin.	851
Terre arable d'Hoffwyll.	880
Terre arable du Jura.	905

L'humus a donc éprouvé le retrait le plus fort : c'est pour ce motif qu'il se gonfle considérablement quand on l'humecte étant sec.

5° *Propriétés hygroscopiques*.—Cette faculté est différente de celle en vertu de laquelle une terre retient l'eau qu'elle a absorbée. Elle dépend surtout de la porosité et des sels déliquescents qu'elle peut renfermer. On la considère comme un indice de la bonne qualité d'une terre. Pour l'évaluer, il suffit de trouver l'augmentation de poids de la terre desséchée préalablement au soleil, puis exposée pendant différents intervalles de temps dans un milieu toujours également saturé d'humidité, et dont la température est de 15° à 18° cent.

DÉSIGNATION des terres.	500 CENTIGRAMMES DE TERRE étendus sur une surface de 36000 millim. carrés ont absorbé en			
	12 heures.	24 heures.	48 heures.	72 heures.
	CENTIG.	CENTIG.	CENTIG.	CENTIG.
Sable siliceux.	0,0	0,0	0,0	0,0
Sable calcaire.	1,0	1,5	1,5	1,5
Gypse.	0,5	0,5	0,5	0,5
Argile maigre	10,5	13,0	14,0	14,0
Argile grasse.	12,5	15,0	17,0	17,5
Terre argileuse.	15,0	18,0	20,0	20,5
Argile pure	18,5	21,0	24,0	24,5
Calcaire en poudre fine. .	13,0	15,5	17,5	17,5
Humus	40,0	48,5	55,0	60,0
Terre de jardin.	17,5	22,5	25,0	26,0
Terre arable d'Hoffwyll. .	8,0	11,5	11,5	11,5
Terre arable du Jura. . .	7,0	9,5	10,0	10,0

Ces résultats démontrent que la faculté d'absorption s'affaiblit à mesure que les terres deviennent plus humides, et que l'humus est la substance la plus hygroscopique de toutes celles examinées.

6° *Absorption du gaz oxygène.* — L'oxygène, principe essentiel à la végétation, est absorbé et introduit dans les plantes par l'intermédiaire de l'eau et des racines. Quand un sous-sol est ramené à la surface de la terre par un labour profond, il doit être privé momentanément de fertilité, comme l'expérience le prouve. Les argiles et les terres argileuses jouissent de la propriété d'absorber ce gaz; M. Boussingault l'attribue à l'oxyde de fer qui s'y trouve au minimum d'oxydation.

M. Schübler a trouvé que cette absorption est très-faible pour le sable et le gypse, très-prononcée pour l'argile et l'humus; comme M. de Humboldt l'avait observé. Une portion de l'oxygène absorbé par l'humus se change en gaz acide carbonique.

7° *Conductibilité des terres pour la chaleur.* —

M. Schübler a mesuré ce pouvoir par la méthode du refroidissement. Voici les résultats qu'il a obtenus :

DÉSIGNATION DES TERRES.	FACULTÉ de retenir la chaleur, celle du sable calcaire étant de 100.	TEMPS QUE 550 CENTIM. cubes de terre mettent à se refroidir de 62°,5 à 21°,2, l'air ambiant étant à 16°,2.
Sable calcaire.	100,0	3h,30m
Sable siliceux.	95,6	3 ,27
Gypse.	73,2	2 ,34
Argile maigre.	76,9	2 ,41
Argile grasse.	71,1	2 ,30
Terre argileuse.	68,4	2 ,24
Argile pure.	66,7	2 ,19
Calcaire en poudre fine.	61,8	2 ,10
Humus.	49,0	1 ,43
Terre de jardin.	64,8	2 ,16
Terre arable d'Hoffwyll.	70,1	2 ,27
Terre arable du Jura. .	74,3	0 ,36

Les sables siliceux et calcaires comparés à volumes égaux aux autres substances consignées dans ce tableau possèdent la plus grande faculté de retenir la chaleur. On voit par là pourquoi les terrains sablonneux, en été, même pendant la nuit, conservent une température élevée. L'humus occupe le dernier rang.

8° *Échauffement des terres exposées au soleil.* — La quantité de chaleur acquise par une terre dépend de l'état de sa surface, de sa composition, de la quantité d'eau qu'elle contient et de l'incidence des rayons solaires. M. Schübler, pour trouver le degré d'échauffement des différentes terres, toutes choses égales d'ailleurs, a fait usage d'une méthode qui n'est pas à l'abri de tout reproche. Il a mesuré les températures acquises par différentes terres humides exposées au soleil pendant le même temps, et autant que possible dans les mêmes conditions. Il a ainsi obtenu :

DÉSIGNATION DES TERRES.	TEMPÉRATURE MAXIMA de la couche supérieure, la température moyenne de l'air ambiant étant 25°.	
	TERRE HUMIDE.	TERRE SÈCHE.
	Degrés centig.	Degrés centig.
Sable siliceux, gris-jaunâtre . . .	37,25	44,75
Sable calcaire, gris-blanchâtre. . .	37,38	44,50
Gypse clair, gris-blanchâtre. . . .	36,35	43,62
Argile maigre, jaunâtre.	36,75	44,12
Argile grasse..	37,25	44,50
Terre argileuse, gris jaunâtre. . .	37,38	44,62
Argile pure, gris-bleuâtre.	37,50	45,00
Terre calcaire, blanche.	35,63	43,00
Humus, gris-noir.	39,75	47,37
Terre de jardin, gris-noir.	37,50	45,25
Terre arable d'Hoffwyll, grise. . .	36,88	44,25
Terre arable du Jura, grise. . . .	36,50	43,75

On voit que la couleur et l'humidité sont les causes qui exercent le plus d'influence pour la même incidence solaire. Toutefois, les différences de température dues à ces causes peuvent aller jusqu'à 14° ou 15°. Les différences provenant de l'état de la surface et de la composition des terres ne sont pas à beaucoup près aussi grandes; quant à celles dues à l'obliquité des rayons solaires, elles peuvent aller jusqu'à 25°.

§ III. — *Des grandes divisions de terres arables.*

Pour établir ces trois divisions, nous prendrons encore pour guide M. Boussingault. Il est nécessaire de définir ce qu'on entend par terres fortes et terres légères : les premières sont celles dans lesquelles domine l'argile; elles sont tenaces, ont peu de perméabilité, et la dessiccation en est lente; les secondes, dans lesquelles domine le sable, possèdent des qualités diamétralement opposées.

Le terreau modifie les propriétés de ces deux terres.

Il leur donne de la qualité, surtout aux premières, dont il diminue la grande ténacité; mais il a l'inconvénient, dans les saisons humides, de rendre les premières extrêmement humides. Si la sécheresse est trop longue, la terre se durcit au point que les plantes ne peuvent y pénétrer.

Les terres légères pèchent rarement par le trop d'humidité; la sécheresse, au contraire, leur est très-nuisible. La végétation s'y développe plus rapidement que dans les autres. L'engrais étant dissous et entraîné facilement par les eaux pluviales, y produit de moins bons effets que dans les terres fortes.

Suivant Thaër et Einhoff, un sol est dit argileux quand il renferme 40 pour 100 de sable. Lorsque le contenu descend à 30, l'orge y réussit mieux que le froment; au-dessous, la culture de l'avoine est fructueuse. Le froment est encore cultivé quand la contenance en sable est de 40 à 50 pour 100. Si elle descend à 50 ou 60, la culture de l'avoine est plus avantageuse; à 70, le sol ne convient plus au froment, mais bien à l'orge; à 75, d'après Thaër, le terrain est propre à la culture de l'avoine. Dans nos climats, quand la terre renferme 90 pour 100 de sable, on en tire difficilement parti, attendu que la sécheresse lui enlève toute cohésion.

Les parties terreuses jouent-elles un rôle direct dans les phénomènes de la nutrition? Les matières terreuses renfermées dans les tissus des végétaux étant semblables à celles qui se trouvent dans le sol, on est porté à répondre affirmativement à cette question. On cite, en faveur de cette manière de voir, les marais salants, qui fournissent aux plantes de la soude provenant de la décomposition du sel marin, tandis que ces mêmes plantes, végétant loin de la mer, renferment de la potasse.

A l'appui de cette opinion, on a dit que certaines plantes se plaisent plutôt dans un terrain que dans un autre; que le noyer, le buis, le *potentila rupestris*, par exemple, préfèrent les terrains calcaires; le châtaignier, le *digitalis purpurea*, etc., les terrains plus ou moins si-

13

liceux. Il y a néanmoins des exceptions, puisque M. de Candolle a vu croître abondamment le buis dans un terrain schisteux et dans des terrains volcaniques. Cette prédilection d'une plante pour tel ou tel terrain ne pourrait-elle pas provenir de propriétés physiques dépendantes de la nature de ce terrain?

Les terrains possèdent des qualités qui dépendent non-seulement de leur composition minéralogique, de leurs propriétés physiques et de la nature du sous-sol, mais encore du climat où ils sont placés, de leur orientation et de leur inclinaison à l'horizon.

D'après les considérations que nous avons déjà présentées touchant les propriétés physiques des terres, on peut en conclure que les terrains argileux conviennent mieux aux climats secs, et les sols sablonneux aux régions humides où les pluies sont fréquentes. Il faut rapporter à ces derniers les pampas, les llanos, les savanes de l'Amérique et les steppes de l'Asie, terrains dans lesquels la végétation est suspendue pendant les grandes sécheresses et reprend à la saison des pluies.

Les déserts arides ne doivent leur stérilité qu'à l'absence de pluie; mais si quelques parties de ces terres sont arrosées par des filets d'eau, comme les oasis en Afrique, la végétation y devient alors active.

Un sol sablonneux, ayant peu de cohésion, doit occuper les parties les moins élevées de la contrée pour qu'il soit productif; il est alors moins exposé à la sécheresse; si le sol est incliné, les eaux pluviales entraînent l'humus et il devient stérile. C'est pour ce motif que les parties abruptes sont couvertes d'arbres, afin de retenir la terre végétale. Les terres fortes exigent, au contraire, une certaine inclinaison pour donner écoulement aux eaux.

L'orientation d'un terrain dépend du climat; dans les régions extratropicales, où l'ombre a toujours la même orientation pendant toute l'année, il n'est pas indifférent d'exposer les plantes à telle ou telle exposition. Les terrains très-inclinés qui regardent le nord, reçoivent nécessairement moins de chaleur et de lumière

et conservent plus longtemps de l'humidité; les sols situés au midi sont, à la vérité, plus exposés à souffrir de la sécheresse, mais aussi la végétation y fait plus de progrès.

En Suisse et dans le nord de l'Écosse, on a remarqué que les pentes qui descendent vers le nord, quand elles ne sont pas trop abruptes, sont plus productives parce que le dégel s'y opère plus lentement.

La craie, qui paraît frappée de stérilité en France, sert à la culture des récoltes vertes dans les contrées humides, comme l'Angleterre. Les terrains tourbeux peuvent être cultivés quand la tourbe est transformée en humus.

Les sables mouvants siliceux ou calcaires, qui occupent souvent une très-grande étendue dans l'intérieur des continents, peuvent être rendus à la culture, bien que leur mobilité leur permette de se déplacer comme une masse liquide; leur stérilité doit être attribuée au manque d'eau, l'eau déterminant une certaine cohérence entre les parties. M. Boussingault rapporte à ce sujet le fait suivant (*Économie rurale*, t. I, p. 638) :

« En Espagne, dans les environs de San-Lucar de « Barameda, un sol poudreux, d'une aridité extrême, « a pu être fertilisé par la main de l'homme. A la sur-« face, les dunes amoncelées de San-Lucar sont re-« couvertes par un sable quartzeux assez ténu pour « être emporté par le vent; mais par cette circonstance « heureuse, qui fait que la partie inférieure de ce terrain « est constamment mouillée par le Guadalquivir, il « suffit d'enlever le sable sec qui le recouvre, de le ni-« veler, de le décaper en quelque sorte, pour obtenir un « sol qui réunit au plus haut degré deux conditions « essentielles à la fertilité. »

La fixation d'un sol mouvant, en le couvrant de plantations productives, a été opérée par M. Bremontier, ingénieur des ponts et chaussées.

Les dunes formées aux dépens des sables rejetés par l'Océan occupent entre les embouchures de la Gironde

et de l'Adour une superficie d'environ 1139 myriamètres carrés, sur une élévation moyenne de 20 mètres. Ces dunes avancent dans les terres par l'impulsion des vents d'ouest avec une vitesse de 24 mètres par an, et finissent par envahir des villages et des forêts. On a calculé qu'en vingt-quatre siècles tout le Bordelais serait envahi par les sables, les dunes avançant en roulant pour ainsi dire sur elles-mêmes. Pour les fixer, il y avait deux choses à faire : développer la végétation, et la protéger contre l'impétuosité des vents de mer jusqu'à ce que les racines des plantes eussent pénétré dans le sol. Bremontier a résolu la question comme il suit : depuis la base des premiers monticules jusqu'à la ligne des plus hautes marées, le terrain est plat, le sable y roule sans s'y arrêter. On commence par y établir un semis de graines de pins et de genêts, et on recouvre le sol de branchages verts fixés solidement par des crochets enfoncés dans le terrain. Au moyen de cet abri, les graines germent et les plantes se développent avec une prodigieuse rapidité. Cette première plantation, qui arrête les sables, est destinée à protéger celles qui doivent la suivre et s'étendre vers l'intérieur des terres. Quand cette plantation a cinq ou six ans, on en fait une autre contiguë à celle-ci sur une largeur de 60 à 100 mètres, puis l'on continue graduellement jusqu'au sommet des dunes. En 1809, les semis occupaient déjà une étendue de 3700 hectares dans le bassin d'Arcachon. Le succès a été tel, qu'en seize années, des pins avaient déjà atteint une élévation de 10 à 12 mètres.

L'exposé que nous venons de présenter de la composition minéralogique et chimique des différentes terres propres à la culture, de leurs propriétés physiques, et des diverses causes qui peuvent les modifier sont du domaine de l'agriculture; aussi trouve-t-on ces parties traitées avec de grands développements dans l'ouvrage de M. Boussingault : *Économie rurale, considérée dans ses rapports avec la chimie, la physique et la météorologie.*

§ IV. — *De l'influence du déboisement et du dessèchement sur la diminution des cours d'eau à la surface du sol.*

Les défrichements et les dessèchements de marais facilitent l'évaporation des eaux pluviales, diminuent la quantité qui en tombe, et influent par conséquent sur les cours d'eau qui arrosent une contrée. On conçoit, en effet, que les forêts, qui entretiennent une humidité continuelle à la surface du sol, s'opposent au dessèchement, et doivent exercer une grande influence sur les cours d'eau. Parmi toutes les observations qui établissent cette vérité, nous citerons les suivantes, dues à M. Boussingault (*Annales de physique et de chimie*, tome LXIV, page 113).

La vallée d'Aragua, province de Venezuela, située à peu de distance de la côte, a un climat très-favorable et un sol d'une grande fertilité. Elle est bornée au nord par la chaîne du littoral, au sud par des montagnes, à l'est et à l'ouest par des collines qui la ferment de toutes parts. Les rivières qui y coulent n'ont donc point d'issue vers l'Océan; en se réunissant, elles donnent naissance au lac de Tacarigua ou de Valenciana, qui, à l'époque où le vit M. de Humboldt, au commencement de ce siècle, éprouvait depuis une trentaine d'années un dessèchement graduel dont on ignorait la cause.

Oviedo, historien de la province de Venezuela dans le XVIe siècle, rapporte que la ville de Nueva-Valencia fut fondée en 1555, à une demi-lieue du lac de Tacarigua. Cette ville, suivant M. de Humboldt, qui visita cette contrée en 1800, en était éloignée de 2700 toises, preuve du retrait des eaux, qu'attestent du reste un grand nombre de faits. Il attribua la diminution des eaux aux nombreux défrichements qui avaient été faits dans la vallée. Voici comment il s'exprime à cet égard : « En abattant les arbres qui couvrent la cime et le flanc « des montagnes, les hommes, sous tous les climats, pré- « parent aux générations futures deux calamités à la

« fois, un manque de combustible et une disette d'eau. »

En 1822, M. Boussingault apprit des habitants que les eaux du lac avaient éprouvé une hausse très-sensible; des terres, jadis cultivées, étaient alors sous les eaux. Dans l'espace de vingt-deux ans, la vallée avait été le théâtre de luttes sanglantes durant la guerre de l'indépendance; la population avait été décimée, les terres étaient restées incultes, et les forêts, qui croissent avec une si prodigieuse rapidité sous les tropiques, avaient fini par occuper une grande partie du pays. On voit par là l'influence qu'exerce le boisage sur la quantité d'eau qui coule ou qui séjourne dans un pays.

M. Boussingault nous fournit encore plusieurs autres exemples du même genre. Il existe plusieurs lacs sur les plateaux de la Nouvelle-Grenade, à une hauteur de 2000 à 3000 mètres, où la température, toute l'année, est de 14° à 16°. Les habitants du village Dubaté, situé près des deux lacs qui étaient réunis il y a une soixantaine d'années, ont été témoins de l'abaissement graduel des eaux, de telle sorte que des terrains qui se trouvaient sous les eaux il y a trente ans sont aujourd'hui livrés à la culture. M. Boussingault s'est assuré que ce changement est dû à la disparition de nombreuses forêts qui ont été abattues.

D'autres lacs, tels que celui de Tota, peu éloigné de Fuquené, situés dans des localités où il n'y a pas eu de déboisements, n'ont éprouvé aucune diminution dans leurs eaux.

M. Desbassyns de Richemond a constaté qu'il existe dans l'île de l'Ascension une belle source au bas d'une montagne, laquelle s'est tarie par l'effet du déboisement, et a retrouvé ses eaux quand la montagne a été reboisée.

L'Europe fournit des exemples du même genre; les lacs de Bienne, de Morat et de Neufchâtel ont éprouvé également un abaissement à la suite de défrichements.

La diminution des eaux provient-elle d'une moindre quantité de pluie tombée ou d'une plus grande évaporation? Les faits suivants répondront à ces questions.

En 1826, les montagnes métallifères de Marmato ne présentaient que quelques misérables cabanes habitées par des nègres esclaves. En 1830, cet état de choses était changé: il y avait de nombreux ateliers et une population de 3000 habitants. On avait été forcé d'abattre beaucoup de bois; le défrichement n'était commencé que depuis deux ans, et l'on s'apercevait déjà de la diminution du volume des eaux employées au travail des machines; cependant un pluviomètre prouva à M. Boussingault que la quantité d'eau tombée la seconde année avait été plus forte que celle recueillie pendant la première. Ce fait tend donc à prouver que le déboisement peut diminuer et faire disparaître des sources, sans qu'il tombe pour cela une moins grande quantité de pluie.

Les observations de Berghaus (*Cours d'Agriculture* de M. Gasparin, p. 146) montrent que le volume des eaux de l'Oder et de l'Elbe s'affaiblit depuis 1778 jusqu'à 1835, pour le premier de ces fleuves, et depuis 1828 jusqu'à 1836 pour le second. Cette diminution est tellement sensible, que, si elle suit toujours la même loi, il faudra changer en 1860 la forme des bateaux. Des recherches statistiques ont prouvé que l'on ne pouvait attribuer ce fait au déboisement des montagnes.

On a cherché, pour l'expliquer, si la quantité de pluie qui tombe dans différents lieux de l'Europe n'allait pas en diminuant; mais on n'a pas été plus heureux: en effet, depuis 1689 que l'on observe la quantité de pluie tombée à Paris, on a plutôt trouvé une légère augmentation qu'une diminution. Césaris a reconnu le même accroissement pour la ville de Milan, depuis 1763 jusqu'à cette époque. Il en est de même à la Rochelle et dans le bassin du Rhône.

L'hypothèse de la diminution de pluie devant être rejetée, on a pensé que peut-être le nombre de pluie aurait pu changer, en se fondant sur ce fait généralement admis, que les grandes pluies fournissent plus d'eau aux rivières que la même quantité d'eau tombée en plusieurs jours séparés par des intervalles de sécheresse;

mais la discussion des observations n'a pas éclairé davantage la question. On en est réduit aux changements apportés dans les climats par la culture.

M. Boussingault, qui a étudié la question du déboisement avec beaucoup de soin, a tiré les conséquences suivantes des faits qu'il a observés : 1° les grands défrichements diminuent la quantité des eaux vives qui coulent dans un pays ; 2° il n'est pas possible de décider si cette diminution doit être attribuée à une moindre quantité annuelle de pluie ou à une plus grande évaporation des eaux pluviales, ou à ces deux effets combinés ; 3° dans les contrées qui n'ont éprouvé aucun changement dans la culture, la quantité d'eaux vives ne paraît pas avoir changé ; 4° les forêts, tout en conservant les eaux vives, ménagent et régularisent leur écoulement ; 5° la culture établie dans un pays aride et découvert dissipe une partie des eaux courantes ; 6° des sources peuvent disparaître par suite de déboisements locaux, sans qu'on puisse en conclure que la quantité annuelle de pluie ait diminué ; 7° les faits météorologiques recueillis dans les régions équinoxiales tendent à montrer que les grands défrichements diminuent la quantité de pluie qui tombe annuellement.

La question du déboisement préoccupe d'autant plus aujourd'hui, que depuis cinquante ans, tous les quatorze ans, la consommation de la houille étant doublée, si cette progression continue, on arrivera promptement à une époque où le combustible manquera.

SECTION IV.

CONSIDÉRATIONS SUR LA DISTRIBUTION DES VÉGÉTAUX ET DES ANIMAUX SUR LE GLOBE.

§ I. — *Des végétaux.*

Le but que nous nous proposons, en esquissant la géographie des plantes, n'est pas précisément d'exposer avec de grands développements leur distribution sur la

surface du globe, mais bien de montrer l'influence qu'exercent sur cette distribution les actions combinées de la chaleur, de la lumière, de l'air, de l'eau et du sol.

Sans chaleur, la vie s'éteint, et selon qu'elle est plus ou moins forte, entre certaines limites, la vie est plus ou moins active. Son action varie avec la latitude, en tenant compte, bien entendu, des causes perturbatrices dont il a été fait mention en exposant la climatologie.

La lumière exerce une action directe sur la composition des tissus, la coloration des fleurs et des feuilles, et la maturation des fruits. Cette action varie, comme celle de la chaleur, avec la latitude, et atteint son maximum sous l'équateur. A latitude égale, toutes choses égales d'ailleurs, elle est plus forte sur les montagnes qu'en plaine, où les jours ont moins de durée. La quantité de vapeur répandue dans l'atmosphère, en mettant obstacle au rayonnement solaire, diminue nécessairement son influence.

L'atmosphère fournit l'acide carbonique aux feuilles, organes de la respiration, qui le décomposent sous l'influence solaire, et l'oxygène aux racines, par l'intermédiaire de l'eau.

L'eau agit à l'état de vapeur ou de brouillard, et à l'état de pluie : à l'état de vapeur, en humectant les feuilles, elle facilite les phénomènes de la respiration ; à l'état de pluie, elle pénètre dans le sol et réagit sur les racines, en leur faisant absorber les substances qu'elle a dissoutes, et dont les plantes ont besoin pour leur nutrition. L'eau, sans le concours simultané de la chaleur et de la lumière, rend les plantes hydropiques.

Les tropiques doivent leur puissante végétation aux fortes pluies qui tombent régulièrement chaque jour en certaines saisons. Les forêts peuvent conserver ainsi une humidité constante et chaude, éminemment favorable à leur développement.

Dans les climats tempérés, les forêts, en s'opposant à l'évaporation, rendent le climat moins sec, et la fréquence de certains vents rend également un climat humide.

Pour bien étudier l'influence de ces divers agents, on a divisé la surface de la terre en quatre zones principales (Ad. de Jussieu, *Cours élémentaire d'histoire naturelle*, partie botanique, p. 691) :

1° Zone équatoriale, s'étendant d'environ 15° à droite et à gauche de l'équateur, et caractérisée par la présence plus exclusive des palmiers et des scitaminées.

2° Zone tropicale, allant du 15e au 24e degré de latitude et caractérisée par les fougères arborescentes, les mélastomacées et les pipéracées.

3° Zone tempérée, s'étendant depuis les tropiques jusqu'au cercle polaire, et dans laquelle la végétation éprouve de grandes variations, en raison des différences de climat qui les composent. On la divise en deux zones secondaires :	Zone juxtatropicale, de 24° à 36° de latitude, parcourue en son milieu par l'isotherme de 20°.	
	Zone tempérée proprement dite.	1° tempérée chaude, correspondant aux lignes isothermes de 15° à 10° 2° tempérée froide, de 10° à 5°. 3° tempérée sous-arctique, de 5° à 0°.
4° La zone polaire, où l'on trouve abondamment les plantes alpines, est divisée en :	Zone arctique,	
	Zone polaire.	

Dans la zone équatoriale, on n'aperçoit aucun changement dans la végétation depuis le niveau de la mer jusqu'à la hauteur de 600 mètres; mais au delà, jusqu'à 1200 mètres, on retrouve la flore de la seconde zone.

Sous l'équateur, ainsi que dans les régions qui en sont peu éloignées, les jours étant sensiblement égaux aux nuits, la différence entre les saisons est peu appréciable, et la température moyenne est celle de toute l'année; aussi la végétation suit-elle une marche régulière. Il n'en est pas de même en s'éloignant de l'équateur; car, la diffé-

rence entre les saisons augmentant, la végétation doit être de plus en plus modifiée.

Sous l'équateur et sous les tropiques, la puissance de la végétation doit donc être à son maximum, puisque les plantes y trouvent abondamment chaleur, humidité et lumière, dont elles ont besoin pour leur développement. Les végétaux ligneux s'y trouvent en très-grande proportion; les forêts y sont vastes et peuplées d'arbres gigantesques, appartenant pour la plupart à des genres et à des familles qui ne sauraient vivre dans les climats tempérés.

Dans les régions tropicales, la végétation est suspendue, quand le sol est siliceux, pendant la sécheresse; mais elle reprend avec vigueur lors de la saison des pluies : les campos du Brésil, les pampas du Paraguay et les llanos de l'Orénoque en sont des exemples remarquables.

La première zone tempérée, ou zone juxtatropicale, indique le passage de la flore tropicale à celle de la zone tempérée; on y trouve effectivement, mêlées çà et là, les plantes des tropiques avec celles de nos climats. Quant aux trois zones secondaires dont se compose la zone tempérée proprement dite, nous dirons que, dans la Provence et dans le Roussillon, faisant partie de la zone chaude, se montrent encore le palmier, le dattier, le myrte, le grenadier, qui appartiennent aux régions tropicales, et en outre les crucifères et quelques espèces de conifères, les cyprès, les pins pignons, les pins d'Alep, les chênes verts, les liéges, les platanes, etc.

Dans la zone froide, où se trouve Paris, température moyenne 10°,8, la flore renferme en grande proportion des familles de la zone chaude, mais elles sont représentées par d'autres espèces : les conifères, par le pin commun, les sapins, les mélèzes; les amentacées, par les chênes, coudriers, hêtres, bouleaux, aunes, saules, qui perdent leurs feuilles pendant l'hiver. Les deux grandes capitales Londres et Berlin, dont la première a pour température moyenne 10°,4, et la seconde 10°,1, sont

situées également à la limite des deux premières zones.

Si l'on s'avance vers le nord, on voit diminuer graduellement le nombre absolu des espèces, ainsi que le nombre relatif de celles de certaines familles. Les espèces appartenant aux malvacées, cistinées, euphorbiacées, disparaissent tout à fait. Sur les côtes de la Scandinavie, le hêtre cesse de se montrer au delà du 59e degré; et le chêne, au delà du 61e, à la limite de la zone tempérée froide.

La zone sous-arctique, qui suit la précédente, est peuplée d'arbres verts. Le sapin cesse de se montrer vers le 68e degré; le pin, jusqu'au 70e, et le bouleau un peu plus loin. Au delà, on ne rencontre plus que des arbrisseaux peu élevés.

Vers l'extrémité de la Laponie, on entre dans la région polaire arctique, où il ne croît que des arbrisseaux très-bas, le bouleau nain qui se montre jusqu'au 71e degré, où la végétation ne se réveille que pendant quelques semaines pour donner naissance à des végétaux vivants et sous-frutescents chétifs et clair-semés, et au rhododendron.

La seconde zone polaire, ou zone polaire proprement dite, est la région des plantes alpines; le Spitzberg s'y trouve compris.

Les hautes montagnes, depuis leurs bases jusqu'à leurs cimes couvertes de neige, présentent les mêmes flores que l'on rencontre successivement en s'avançant sous des latitudes plus élevées. Ainsi, en gravissant les Alpes, on voit disparaître les espèces suivantes à des hauteurs différentes, et qui varient suivant l'exposition des versants, comme on le voit dans ce tableau.

LIMITE DES DIFFÉRENTS ARBRES SUR LES DEUX VERSANTS DU MONT VENTOUX.

(*Annales des Sciences nat.*, 2e série, t. x, p. 228.)

ARBRES.	VERSANT méridional.	VERSANT septentrional.
Pin d'Alep.	430m	»
Chêne yeuse.	538	618m
Noyer	»	800
Hêtre	1660	1380
Epicéa	»	1720
Pin Mugho.	1810	»
Sommet de la montagne . .	1911	»

D'après M. Kaemtz (*Traité de météorologie*, p. 221): dans le nord de la Suisse, le hêtre ne va pas au delà de 1300 mètres, l'épicéa s'arrête à 1800. Sur le versant méridional du mont Rose, les arbres montent jusqu'à 2270 mètres, savoir : les mélèzes, les épicéas, les cembro, les aunes et les bouleaux. Au nord, les arbres verts ne dépassent pas 2000 mètres. Sur l'Ararat, les bouleaux finissent à 2530 mètres; sur le Caucase, à 2360 mètres; sur le revers méridional des Pyrénées, les sapins finissent à 2570 mètres; au nord, les pins à 2420 mètres.

Dans les Alpes, lorsque les arbres verts et le bouleau ont disparu, les arbres deviennent rabougris, et on arrive au rhododendron, puis aux plantes alpines d'une autre espèce que celles des hautes latitudes, ou plantes vivaces rasant la terre; enfin les plantes alpines disparaissent elles-mêmes successivement, et l'on finit par ne plus trouver que des lichens, qui se montrent probablement partout où il y a de la matière.

Cette similitude entre les flores des montagnes à différentes hauteurs et celles des régions situées au niveau des mers, à des latitudes de plus en plus élevées, met

bien en évidence l'influence de la chaleur sur la distribution des végétaux à la surface de la terre.

Dans le tableau que nous avons tracé des diverses zones de végétation, suivant la latitude et la hauteur, nous sommes partis de la côte occidentale de l'Europe, ayant un climat marin ou favorisé; mais, si l'on pénètre dans l'intérieur du continent, en suivant le même méridien et se dirigeant vers le nord, on voit que les lignes isothermes s'abaissent vers le sud, et que les différentes zones de végétation s'arrêtent à des latitudes moins élevées, et d'autant moins que l'on s'avance davantage vers le centre.

Les flores des différentes régions de montagnes nous conduisent naturellement à comparer ensemble la végétation des principales montagnes du globe, telles que le Caucase, l'Altaï, l'Hymalaya, les Andes des deux Amériques, les Pyrénées, les Apennins, etc., afin de voir si cette végétation est la même, ou si chacune ou plusieurs de ces montagnes ont eu des centres primitifs de création. Dans les montagnes d'Asie, les mêmes familles et les mêmes genres sont représentés par d'autres familles que celles que l'on trouve sur les montagnes d'Europe, tandis qu'en Amérique, quoique les familles soient les mêmes, la plupart des genres sont nouveaux. Ces différences semblent annoncer des centres de création propres à certaines régions de montagnes.

Les zones polaires glaciales, dans l'ancien et le nouveau continent, ne présentent pas des différences aussi marquées, autant que l'on peut en juger par les observations faites en Laponie, par M. Vallemberg, et dans l'île Melville, par M. R. Brown. Dans cette dernière, qui peut être considérée comme l'extrême limite de la végétation, dont la température moyenne est de — 18°, et où le thermomètre descend quelquefois, en hiver, à — 33°, tandis qu'en été, elle ne va pas à + 3, M. R. Brown a trouvé 116 plantes, savoir :

49 cryptogames et 67 phanérogames, parmi lesquelles il y a :

26 Dicotylédonées 8 Monocotylédonées 36 Acotylédonées	71 communes au nord de l'Europe.
20 Dicotylédonées 12 Monocotylédonées 13 Acotylédonées	45 appartiennent au nord de l'Amérique.

Enfin, Ramond, sur l'un des sommets des Pyrénées, a reconnu que, sur 133 plantes, il y avait 35 espèces, savoir : 15 cryptogames et 20 phanérogames, identiques avec celles de l'île Melville.

On ne sait rien touchant la végétation des terres polaires antarctiques, que l'on n'a encore vues que couvertes de glace.

Si l'on compare la zone tempérée de chacun des deux hémisphères, on trouve qu'en Asie elle occupe une vaste étendue bornée au nord par une partie de la Sibérie, sur le versant septentrional de l'Altaï, renfermant au sud ce qu'on appelle le Levant, et se terminant aux pentes méridionales de l'Hymalaya; la partie centrale a à peine été explorée: on ne connaît que les limites. La végétation au nord, dans le Levant, est analogue à celle de l'Europe, à même température moyenne; au midi, elle se mélange avec celle des tropiques. En Sibérie, l'abaissement considérable de température ramène à la région sous-arctique, sur un grand nombre de points, bien que la latitude soit moins élevée; on y trouve beaucoup d'espèces nouvelles de familles d'Europe, dont plusieurs se développent sous l'influence d'étés comparativement très-chauds.

La zone tempérée asiatique se termine à l'est vers la partie septentrionale de la Chine et le Japon, où se montrent encore des traces de la végétation européenne, puisqu'on y trouve des plantes appartenant aux mêmes familles et aux mêmes genres, mélangées avec d'autres familles étrangères à l'Europe, que l'on rencontre en Amérique. La Chine renferme le thé; le Japon, le camélia, plantes de la zone chaude.

Dans l'Amérique septentrionale, la zone tempérée est occupée par les États-Unis. La zone chaude est caractérisée par le mélange des familles qu'on trouve en Chine, au Japon et en Europe.

La zone froide ne renferme, comparée à celle d'Europe, qu'un très-petit nombre de crucifères, d'ombellifères, de chicoracées et de cinarées; mais on y trouve, en abondance, des aster solidago, et des arbres appartenant à la famille des conifères et des amentacées, dont les espèces, appartenant aux mêmes genres que ceux d'Europe, sont différentes et beaucoup plus variées; ces espèces sont des pins, sapins, mélèzes, thuyas, genévriers, etc.; charmes, bouleaux, aunes, noyers, frênes, saules, érables, et surtout des chênes.

Dans l'Amérique du Sud, la flore de la zone tempérée froide, qui s'étend presque vers les terres Magellaniques, a beaucoup de ressemblance avec celle de l'autre hémisphère; dans l'un et dans l'autre, on trouve des saules et des hêtres atteignant des hauteurs assez considérables. En remontant vers le nord, d'un côté jusqu'à l'embouchure du Rio de la Plata, de l'autre, jusqu'aux frontières septentrionales du Chili, où l'on atteint la région juxtatropicale, on rencontre successivement toutes les modifications propres à la zone tempérée. Au Chili, sur cent familles, il y en a environ une quinzaine qui n'existent pas en Europe, et plusieurs, telles que les loasées, gilliesiacées, francoacées, malesherbiacées, solanacées, qui ne se trouvent que dans la première contrée.

Sous l'équateur, dans les Andes, la région qui correspond à la zone tempérée est située entre 1000 et 3000 mètres; on y trouve, dans toute son étendue, depuis la limite où croissent les fougères arborescentes, des quinquinas dont les espèces varient avec la hauteur, et qui servent à caractériser cette région.

Les plantes tropicales se montrent, dans cette zone, à une hauteur plus grande que celle qui est relative à sa latitude.

Si nous nous transportons dans la Nouvelle-Hollande,

nous y voyons, depuis le 32e degré jusqu'à l'extrémité méridionale, une flore spéciale; plus des neuf dixièmes des espèces, dont plusieurs constituent des familles distinctes, n'ont encore été trouvées que dans cette contrée. Dans la partie septentrionale, la végétation a de la ressemblance avec celle des tropiques; la moitié des espèces appartiennent à des myrtacées, des légumineuses, des eucalyptus, des acacias, dont les feuilles sont réduites à des phyllódes.

Dans les îles de la Nouvelle-Zélande, à peu de distance où se trouve l'antipode de Paris, la végétation a de la ressemblance avec celle de la Nouvelle-Hollande, et diffère, par conséquent, de celle de nos contrées, même du midi de la France, puisqu'on y trouve des palmiers, des fougères, des dracenas en arbres, etc.

Au cap de Bonne-Espérance, la flore a de l'analogie avec celle des terres australes.

La végétation des îles diffère de celle des continents, à cause de leur climat spécial; mais quand elles ont une certaine étendue, leur flore s'en rapproche beaucoup; néanmoins, en raison du plus grand développement relatif de leur littoral, il s'y trouve une plus grande proportion de terrains participant aux climats marins. On y rencontre abondamment des acotylédonées cellulaires et des fougères.

Les exemples suivants serviront à montrer l'influence de l'étendue des îles sur la flore.

Dans la grande île de la Jamaïque, le nombre des fougères est à celui des espèces phanérogames dans le rapport de 1 à 10; dans les îles de France et de Bourbon, ce rapport est celui de 1 à 8; dans la Nouvelle-Zélande, comme 1 est à 6; à Otaïti, comme 1 est à 4; à l'île Norfolk, comme 1 est à 3; et enfin, à l'île de Tristan d'Acunha, comme 1 est à 2.

On a remarqué encore, en comparant la flore des îles avec celle des continents, que le nombre total des espèces est d'autant moindre que l'île non-seulement est plus petite, mais encore est plus isolée de toutes terres,

et que les causes qui s'opposent à la transmission des espèces par l'émigration exercent une grande influence sur la flore des îles isolées au milieu de l'Océan. Le climat marin, à mesure que l'on s'éloigne des tropiques, paraît nuire à la végétation arborescente; cet effet pourrait être dû à la violence et à la fréquence des vents.

Le sol, selon qu'il est liquide ou solide, influe singulièrement sur la distribution des plantes. La mer nous présente des algues qui se cramponnent aux rochers et se nourrissent des éléments qu'elles prennent au liquide environnant. Il y en a qui flottent à sa surface, comme le raisin des tropiques, plante acotylédone dépourvue de racines fixées.

Les eaux douces ont aussi leurs algues, pour la plupart fixées au fond; elles sont également habitées par des familles cryptogames, telles que les conferves, les characées, les rhizocarpées, les mousses hépatiques.

Les eaux stagnantes, les eaux courantes et l'eau glacée ont leurs espèces particulières, ainsi que l'eau salée et l'eau douce. Certaines plantes d'eau douce meurent dans l'eau salée. Il y a des plantes en outre qui se propagent dans les sables du rivage et s'avancent même assez loin dans la mer: telles sont les avicennis, les mangliers qui croissent sur les terres tropicales, et dont les racines, en s'élevant au-dessus de la mer, forment des arcs-boutants au centre desquels s'élance la tige.

On trouve, dans les terrains marécageux qui se changent en tourbières, des mousses, des fougères dont les racines, en s'enchevêtrant les unes dans les autres, forment un terrain spongieux et mouvant. Ces plantes périssent chaque année, cèdent leur place à d'autres, et ainsi de suite; les détritus, en s'accumulant, exhaussent continuellement le fond des marais. Mais comme les parties déjà recouvertes sont de plus en plus soustraites à l'action des agents extérieurs, leur décomposition devient excessivement lente.

Nous avons dit, plus haut, que probablement les lichens croissaient partout où il y avait de la matière.

En effet, les lichens, sous forme de croûte, sont les premiers végétaux qui paraissent sur la surface des roches; viennent ensuite les lichens foliacés, les mousses, les fougères, les graminées et autres plantes phanérogames, et alors le sol est formé. Il est à remarquer que la série des plantes qui apparaissent successivement sur un rocher ou sur un terrain non encore livré à la culture et composé de débris de roches difficilement altérables, a quelque rapport, en raison de leur mode de végétation, avec celle des plantes que l'on rencontre en descendant d'une montagne très-élevée, à partir de la limite des neiges éternelles.

Des climats ou régions agricoles.

La distribution des végétaux cultivés qui servent à la nourriture de l'homme ou des animaux à son usage, dépend du climat et de diverses causes que nous allons indiquer. Pour en faciliter l'étude, on a divisé la surface terrestre en climats ou régions agricoles, selon la nature des végétaux que l'on considère. M. de Gasparin (*Cours d'agriculture*, t. II, p. 325), pour établir cette division, considère :

1° Quelle est la plante qui, dans une région, donne les résultats les plus assurés et est cultivée de préférence à toute autre, de manière à lui imprimer un caractère principal;

2° Quelles sont les cultures accessoires ayant pour objet des plantes qui vivent et prospèrent dans une contrée sans y acquérir un développement assez riche pour y tenir le premier rang;

3° Quelles sont les limites géographiques qui indiquent l'enceinte dans laquelle la culture principale conserve son ascendant et les degrés de cet ascendant à mesure qu'on approche des limites signalées en général par l'admission ou le rejet de nouvelles cultures accessoires;

4° Quels sont les caractères météorologiques qui accompagnent le caractère cultural pour que l'on puisse,

dans d'autres lieux et dans d'autres circonstances, prévoir les plantes que l'on peut introduire le plus avantageusement possible dans la culture?

M. de Gasparin établit trois grandes divisions de régions agricoles en Europe, en y comprenant les pays qui l'avoisinent de plus près; la première, au sud-est et au sud, comprend l'olivier, le mûrier et la vigne; cette division est le siége des cultures ligneuses et frutescentes; la deuxième, au nord-est et au nord, ne présente plus que les plantes herbacées; la troisième, plus au nord, se compose des forêts ou des végétaux ligneux que l'on élève seulement pour leur bois. Les mêmes divisions se retrouvent à mesure que l'on s'élève sur les montagnes.

La première division se sous-divise en deux grandes régions: celle des oliviers, et la région de la vigne et du mûrier.

La seconde division comprend la culture des céréales et des herbages.

La troisième division, celle des forêts, peut se diviser encore en deux régions distinctes: l'une dans laquelle les arbres verts sont mêlés avec les arbres à feuilles caduques; l'autre où les arbres verts dominent et où l'on rencontre le bouleau, qui termine la série des végétaux utiles dans le nord.

M. de Gasparin admet donc en Europe cinq divisions agricoles:

1° La région des oliviers,
2° La région des vignes,
3° La région des céréales,
4° La région des herbages,
5° La région des forêts.

La carte planche II, fig. 1, représente la division de l'Europe occidentale sous le rapport des régions agricoles. La légende placée à côté de la figure indique à quelles régions correspondent les ombres tracées sur les continents.

Avant de parler des limites de ces régions, nous de-

vons rappeler le procédé approximatif à l'aide duquel on évalue la somme de chaleur nécessaire à la floraison et à la fructification des plantes, dans un temps donné ou pendant toute une saison. C'est à Réaumur (*Mém. de l'Acad. des sciences*, 1735) que l'on doit l'introduction dans la science de cette donnée approximative, qui est d'une grande utilité, comme on en jugera par les résultats qui seront rapportés plus loin. Si, par exemple, une plante germe, croît, et fructifie dans l'espace des trois mois de printemps, et que la température moyenne ait été de 20° pendant ces trois mois, alors, en multipliant le nombre de jours des trois mois, ou 90, par la température moyenne 20°, on a le nombre 1800, qui représente la quantité de chaleur moyenne nécessaire au développement de cette plante. Au lieu d'employer le nom de degré pour désigner cette valeur 1800, il serait plus convenable de lui donner le nom de *calorie météorologique*, en remarquant que l'on désigne en physique par *calorie* la quantité de chaleur nécessaire pour élever l'unité de poids d'eau de 0° à 1°. Ainsi, dans l'exemple précédent, on dirait, suivant cette dénomination, qu'il a fallu 1800 calories moyennes ou simplement 1800^c de température moyenne pour le développement et la fructification de la plante. Nous nous servirons, dans le courant de cet ouvrage, de cette dénomination de calorie pour évaluer la somme de chaleur nécessaire à la floraison ou à la fructification. On fait usage non-seulement du nombre de calories de température moyenne, c'est-à-dire du produit du nombre de jours par la moyenne diurne, mais encore de ce que l'on appelle quantité de chaleur solaire ou calories solaire. M. de Gasparin appelle quantité de chaleur totale solaire le nombre que l'on obtient en prenant la demi-somme de la température minimum du jour observée à l'ombre, et de la température maximum observée au moyen d'un thermomètre exposé au soleil, contre un mur, au midi. On fait cette évaluation tous les jours, soit que le temps soit nébuleux ou non, car le soleil, quoique couvert,

laisse encore passer des rayons calorifiques à travers les nuages. Alors la différence entre ce nombre et la température moyenne diurne donne la chaleur moyenne solaire diurne (Gasparin, t. II, p. 78).

Région des oliviers. — Elle comprend les contrées suivantes : la côte septentrionale de l'Afrique, les îles de la Méditerranée, la Sardaigne, la Corse, les îles Baléares, où la vigne s'associe à la culture des oliviers, la Sicile, où il semble cantonné sur la côte orientale, la Grèce, la Judée, l'Asie-Mineure; le mûrier se montre dans tous les lieux où la population est rassemblée; on trouve l'olivier en Crimée, sur la côte est de l'Espagne, où il ne remonte pas au delà du Portugal; en revanche, la côte occidentale de l'Espagne montre partout l'olivier au premier rang. Au nord des Pyrénées, ses limites sont, en France, à Arles (Ariége), Olette, Carcassonne, Sidobre, Saint-Chignan, Saint-Pons, Lodève, le Vigan, Saint-Jean-du-Gard, Alais, les Vans, Joyeuse, Aubenas, Beauchâtel, Donzère, Montségur, Nyons, Villeperdrix, le Buis, Sisteron, Digne, Bargemont, etc. Dans les différentes vallées où il pénètre, il atteint les altitudes suivantes : à Alais 300^m, Bargemont 602^m, Seillans 611^m, Fayence 622^m, Grasse 453^m, Vence 433^m. Dans ces mêmes contrées, le chêne blanc s'arrête à 1000^m d'élévation.

L'olivier traverse les Alpes, gagne le pied méridional de l'Apennin, pénètre dans le royaume de Naples, où on le trouve sur les deux pentes de la chaîne, puis sur le bord opposé de l'Adriatique, en Dalmatie; et de là il passe en Grèce.

Dans la région des oliviers, la température ne doit pas descendre à 7° ou 8° au-dessous de zéro, ou, si elle est plus basse, elle ne doit pas durer plus de huit jours. La culture n'est fructueuse qu'autant que, depuis le moment où le thermomètre a atteint au printemps la température moyenne de plus de 19°, qui est celle de la floraison de l'arbre, la quantité de chaleur reçue est de 1099^c de chaleur solaire en sus de la quantité

moyenne de chaleur de l'air, ou, en totalité, 3978^{c}. (Gasparin, t. II, p. 333.)

Région des vignes. — « La culture de la vigne a « pour limites, au midi, celle des oliviers. Elle embrasse « ensuite une grande partie du plateau central de l'Es- « pagne et toutes les côtes ouest et nord; la France, à « l'ouest des Corbières et au nord de la limite des oli- « viers, jusqu'à une ligne qui, partant de Guérande, « à l'embouchure de la Loire, se dirige vers le Rhin en « passant un peu au nord de Paris, et s'arrête aux envi- « rons de Dresde. De là, rétrogradant le long des fron- « tières de la Bohême pour venir reprendre le Rhin au « nord de Coblentz, la ligne limite suit ce fleuve et en- « ferme les bords du lac de Constance, retourne alors « vers l'ouest à l'approche des hautes montagnes de la « Suisse, ne comprend dans son enceinte que les par- « ties inférieures des vallées de l'Aar, de la Thièle, du « lac Léman et le Valais. Traversant les Alpes vers le « milieu de ce dernier canton, elle en suit les pentes « méridionales, embrasse la terre ferme de Venise, « revient traverser les Alpes pour enfermer la basse « Autriche, la Hongrie, la Valachie, et s'étend vers « l'orient jusqu'en Crimée. Les pays montagneux, « la Servie, la Bulgarie, sont seuls exceptés, et for- « ment des îles terrestres appartenant à la région des « céréales et à celles des pâturages. Telle est l'immense « étendue de terrain sur laquelle la vigne est suscepti- « ble de croître et de porter ses fruits à maturité en « Europe. »

Pour que la vigne fleurisse, il lui faut une température moyenne de 17° ou 18°, selon la précocité des espèces. A Paris, c'est vers le 11 juin que la floraison a lieu. Depuis cette époque jusqu'au 1er octobre, époque ordinaire de la vendange, quand la température descend au-dessous de 12°,5, le raisin cesse de mûrir. Pour la maturité du raisin, il ne suffit pas de supputer la température moyenne, il faut avoir égard encore à la chaleur solaire. Voici le calcul que M. de Gasparin a fait pour Paris :

Quantité de chaleur moyenne........	1925^{c},67
Quantité de chaleur solaire pour 61 jours clairs à 18°,3, et pour les 50 autres, 2°,5 de chaleur solaire (1)................	751^{c},00
Somme.....................	2676^{c},67

Ce nombre correspond au minimum de chaleur qu'exige le raisin rouge entre sa floraison et sa maturité, puisque l'on se trouve très-près de la limite de la région.

A Bruxelles, on obtient depuis l'époque de la floraison jusqu'au 1er octobre, où la température descend à 12°,5:

Quantité de chaleur moyenne de l'air...	1914^{c},2
45 jours clairs, 67 mi-clairs et couverts..	619^{c},0
	2533^{c},2

Ainsi, une simple différence de 144^{c} sépare la région où la récolte du vin est possible de celle où elle ne l'est pas.

Le climat de la vigne est caractérisé par la possibilité d'atteindre une quantité de chaleur totale (atmosphérique et solaire) de 2680^{c} au moins pour les espèces les plus précoces de raisin rouge, et de 2600^{c} pour les espèces blanches, entre l'époque de la floraison de la vigne et celle où la température moyenne de l'air est descendue à 12°,5.

Les limites de la culture de la vigne sont soumises à des changements dont on a apprécié les causes dans ces derniers temps. Jadis elle s'étendait jusqu'en Bretagne et en Normandie, où on faisait du vin potable. Aujourd'hui cette limite s'arrête à l'ouest vers Nantes (lat. 47°,20); elle remonte vers Paris (lat. 49°), et plus haut, en Champagne, sur la Moselle et le Rhin, jusque vers le 51° de latitude, puis passe en Silésie au même degré, redescend

(1) Pour tenir compte de la décroissance de la durée des jours, on multiplie chacun des termes de la chaleur solaire par le nombre d'heures de chaque jour, et l'on divise par 24 heures.

en Hongrie à 48°49', va jusqu'en Crimée et au nord de la mer Caspienne, où toutes traces cessent.

La limite méridionale se trouve, dit-on, aux Canaries, vers 27°48' de latitude; elle suit le littoral de la Barbarie, est interrompue, puis reparaît sur un petit point de l'Égypte, pour se montrer ensuite en Perse par 29° et même 27°. La vigne n'est pas cultivée en Chine; au Japon, elle n'y réussit pas.

Dans le nouveau monde, on n'a fait encore que des essais heureux à la vérité, mais qui ne permettent pas d'établir les limites de sa culture.

Quant aux montagnes de l'Europe sur lesquelles on la cultive, nous dirons qu'en Hongrie sa culture va jusqu'à 300 mètres; dans le nord de la Suisse, à 550 mètres; elle ne dépasse pas 650 mètres sur le versant méridional des Alpes; elle s'approche de 960 mètres dans l'Apennin méridional et en Sicile. A Ténériffe, elle va jusqu'à 800 mètres.

La vigne exige donc un climat tempéré pour sa culture; mais pour qu'elle arrive à maturité, il faut avoir égard, non-seulement à la température moyenne, mais encore à celle de l'été et de l'automne, afin que le fruit arrive à maturité. La chaleur de l'été doit être assez prolongée pour que cette maturité, qui se termine en automne, soit alors suffisante.

« *Région des céréales*. — Au nord et à l'est de la ré« gion des vignes se trouve la région des céréales. Elle suit « la limite de la région des vignes au midi. Sa limite, au « nord, rencontre la région des pâturages ou celle des fo« rêts; elle laisse en dehors, en France, une partie des « côtes du Poitou, de la Bretagne, de la Normandie, de « la Picardie, que leur climat et la nature de leur sol pla« cent dans la région des pâturages; il en est de même des « côtes de la Belgique, de la Hollande tout entière, et « de certaines parties de la Westphalie, du Danemark et « de la Norwége. »

M. de Gasparin n'a pas placé les îles Britanniques dans cette circonscription, parce qu'il s'est demandé si

elles ne sont tout entières hors de la région, car sans le haut prix où la législation maintient le froment, l'éducation du bétail y serait peut-être la plus fructueuse. Le midi de la Suède et de la Russie paraît faire partie de la région céréale, quand ces pays ne passent pas à la région forestière.

La culture des céréales exclut un certain degré d'humidité, attendu que le climat humide favorise la production spontanée des herbages et des récoltes de racines; la culture disparaît tout à fait dans le nord quand la température totale de l'été cesse de donner la somme de calories nécessaire pour la maturité des grains.

La maturation des céréales n'a pas lieu aux mêmes époques dans les pays chauds comme l'Espagne et l'Afrique, dans les pays tempérés comme en France, et dans les pays froids comme les régions septentrionales. A Upsal, la moisson se fait en même temps que dans le midi de l'Angleterre, et cependant la température moyenne de l'été est à Londres de 17°,1, et à Upsal de 15°,1. La maturité s'opère à Londres sous l'influence d'un été qui donne 1560^c de chaleur, et à Upsal 1389^c seulement. Cette différence tient à ce que dans le nord, pendant l'été, le ciel est plus clair et les jours plus longs qu'à Londres, où le ciel est brumeux et la latitude moins élevée.

Suivant M. Boussingault, le blé exige 2000^c de chaleur moyenne depuis la végétation printanière, c'est-à-dire depuis la température moyenne de + 6°. Ce point de départ en moyenne est à Orange le 1er mars, à Paris le 20 mars, à Upsal le 20 avril; la récolte a lieu, année moyenne, à Orange le 25 juin, à Paris le 1er août, à Upsal le 20 août. Pendant ces périodes, la chaleur moyenne a donné à Orange 1601^c,3, à Paris 1943^c,7, à Upsal 1546^c. A Upsal, où les nuits d'été sont très-courtes, malgré l'obliquité des rayons solaires, le froment y mûrit avec une quantité de chaleur moyenne très-peu différente de celle d'Orange; à Paris, le ciel, plus brumeux, entraîne une plus longue durée de temps

qui produit une plus grande somme de chaleur moyenne. En effet, si l'on suppute la chaleur moyenne solaire pour Orange et Paris, on a :

Paris.		Orange.	
10 jours de mars.	109	Mars......	517,7
Avril...........	474	Avril.....	579
Mai............	579,7	Mai......	691,3
Juin...........	579	25j. de juin.	680
Juillet..........	691		
	2432°,7		2468°,0

Cette égalité montre qu'il faut avoir égard à la quantité de chaleur moyenne et de chaleur solaire pour connaître l'influence exercée par la chaleur sur la végétation.

Dans le nord, près du cercle polaire, des circonstances particulières modifient ces résultats; par exemple, à Lyngen, près du cap Nord, sous 70° de latitude, on a des récoltes en blé abondantes dans des lieux abrités des vents de mer, quoique la neige n'y disparaisse que le 10 juin; mais alors, comme il n'y a pas de nuit pendant un mois, la moisson se fait à la fin d'août : le froment a donc suivi toutes les phases de la végétation en 72 jours. Pendant ce laps de temps, la chaleur atmosphérique a fourni 1582^c de chaleur, c'est-à-dire 886^c de moins qu'à Orange. Dans toutes les évaluations, il faut tenir compte de la végétation qui a lieu pendant la nuit, laquelle est à peu près moitié de celle du jour; mais comme l'acide carbonique n'est décomposé que sous l'influence solaire, il n'y a pas fixation de carbone, et le travail de la fructification n'avance pas.

On ne peut donc comparer rigoureusement les effets calorifiques de chacune des deux contrées qu'en soustrayant du chiffre d'Orange toute la chaleur nocturne. D'après le calcul de M. de Gasparin, on a, pour les quantités de chaleur ou calories nocturnes prises sur les tableaux des températures horaires :

Mars, 12 heures de nuit........	248^{c}
Avril, 11 heures..............	198
Mai, 9 heures.................	226
25 jours de juin, 6 heures......	144
	816^{c}

En retranchant 816^{c} de 2468^{c} on a 1652^{c}; on voit par là que l'on peut obtenir avec une certaine approximation, faute d'observations assez exactes, la somme des chaleurs solaires de jour et celle des quantités de chaleur atmosphérique de nuit.

MM. Colin et Edwards avaient annoncé que le froment ne fournissait qu'une végétation herbacée quand cette plante était soumise à une température atmosphérique de plus de 22°; mais M. Codazzi a trouvé que le froment fructifiait sous une température constante de 23° à 24° dans la vallée d'Aragua, État de Venezuela. (*Comptes rendus de l'Acad. des sc.*, t. XII, p. 478.) On pourrait citer d'autres exemples du même genre.

Le maïs présente dans sa culture des effets analogues. Cette céréale mûrit mal à Paris, tandis qu'elle mûrit bien en Alsace, où le ciel est moins nébuleux. On le sème à Orange au commencement d'avril, et on le récolte au mois de septembre. Il reçoit en tout 4108^{c} de chaleur pendant le jour et pendant la nuit. Le blé n'exige pour sa maturité que 2460^{c} à 2500^{c}.

La pomme de terre exige à Orange 1800^{c} de chaleur atmosphérique de mars à juillet ou de juillet à octobre, tandis qu'en Alsace il lui faut 2800^{c}, et à Santa-Fé de Bogota, suivant M. Boussingault, 2900^{c}. Il est à observer que cette plante, présentant des espèces plus précoces les unes que les autres, ne peut servir de terme de comparaison.

M. de Gasparin, dans l'exposé que nous venons de donner des régions agricoles, n'a pu les étendre, faute d'observations, qu'à une portion de l'Europe. Pour y suppléer néanmoins autant qu'il est possible, nous

présenterons un aperçu des recherches de M. Schouw à ce sujet.

En commençant par les latitudes les plus élevées, on trouve que les céréales sont cultivées en Scandinavie, jusque vers le 70e degré, où l'on cesse de trouver les arbres. Cette culture cesse vers 60° dans l'ouest de la Sibérie, vers 55° plus à l'est. Près de la côte orientale, elle n'atteint pas le Kamtschatka, c'est-à-dire le 51e degré. En Amérique, elle va jusqu'au 57e sur la côte occidentale, tandis que sur la côte orientale elle ne dépasse pas le 50e ou au plus le 52e degré. La ligne qui la circonscrit au nord, dans les deux continents, suit donc les mêmes inflexions que les lignes isothermes dans ces régions.

Toutes les céréales ne prospèrent pas dans ces latitudes élevées. L'orge est celui qui atteint la limite supérieure. Vient ensuite l'avoine, puis le seigle, qui est cultivé sous des latitudes moins élevées. La culture du seigle a lieu dans la partie de la zone froide tempérée où se trouvent la partie méridionale de la Suède et de la Norwége, le Danemark, la plupart des pays riverains de la Baltique, le nord de l'Allemagne et une portion de la Sibérie. On commence ensuite à rencontrer la culture du froment concurremment avec celle du seigle, puis sans le seigle. La grande zone où l'on cultive le blé proprement dit comprend, outre les pays déjà dénommés, une partie de l'Allemagne, la Hongrie, la Crimée, le Caucase et quelques-unes des parties de l'Asie centrale.

En descendant plus au sud, et allant jusqu'au midi de la France, puis pénétrant en Espagne, en Italie, en Grèce, dans l'Asie-Mineure, la Syrie, la Perse, le nord de l'Inde, la Barbarie et les Canaries, on trouve que le froment est cultivé concurremment avec le maïs, sous la zone torride; le maïs domine en Amérique, et le riz en Asie.

Dans l'hémisphère austral, le blé domine dans le midi du Brésil, à Buénos-Ayres, au Chili, au cap de Bonne-Espérance, dans la Nouvelle-Galles du Sud, dans la Nouvelle-Hollande. L'orge et le seigle se rencontrent plus

au midi, notamment dans l'île Van-Diémen. Si l'on suit la distribution des céréales à mesure que l'on s'élève dans les montagnes, on la trouve analogue à celle qui a lieu en allant dans des latitudes plus élevées; l'orge est la céréale qui est cultivée dans la région la plus élevée, ensuite l'avoine.

Région des pâturages. — On désigne ainsi les contrées où l'herbe servant à la nourriture du bétail croît spontanément. On distingue une région et deux sous-régions. En France (*Cours d'agriculture*, t. II, p. 355, Gasparin), la région comprend les parties du Poitou, de la Bretagne et de la Normandie qui se rapprochent le plus des côtes, et particulièrement le fond des vallées; en Angleterre, la moitié des provinces occidentales, l'Irlande, l'Écosse, la Hollande.

La première sous-région, celle des pâturages d'hiver, comprend les Landes, la basse Camargue, les côtes de Corse et de Sardaigne, de vastes terrains en Algérie, les maremmes de la Toscane, etc.

La deuxième sous-région, couverte de neige en hiver, comprend, outre toutes les cimes et les plateaux des montagnes, la Westphalie, le Danemark, la Norwége, la Laponie, la Russie et une partie de la Sibérie, jusque vers le 68e degré de latitude.

La terre des pâturages pérennes doit renfermer, après trois jours de pluie, plus de 0,23 d'eau; celles des pâturages d'hiver et d'été possèdent cette propriété pendant la saison des herbages. Il faut en excepter toutefois la partie des pâturages d'hiver dont le sol est aride, et qui ne peut servir que de pâture aux moutons.

Région des forêts.—Cette région comprend les parties des autres régions qui ne peuvent être transformées en pâturages.

Dans le nord, elle embrasse une vaste étendue comprenant tous les pays où la longue durée des hivers ne permet pas aux habitants de nourrir avec profit les animaux; elle occupe par conséquent les parties les plus élevées et les plus escarpées des montagnes.

Des effets produits sur les plantes par les maxima et les minima de température.

La température nécessaire pour mettre en mouvement la séve dans les plantes varie avec chaque espèce; elle ne doit pas néanmoins dépasser un certain maximum, au delà duquel la plante languit et finit par mourir. Si quelques cryptogames, par exception, se développent dans des eaux thermales dont la température approche de celle de l'ébullition, la plupart des végétaux ne peuvent supporter dans l'air une température supérieure à 50°. Hâtons-nous toutefois d'ajouter que cette température extrême, ainsi que celles qui en sont voisines, ne peut être que passagère; car la végétation ne tarderait pas à s'anéantir. Ce qui importe en général aux plantes pour arriver à maturité, c'est la température moyenne estivale.

L'influence du froid agit bien plus puissamment encore sur les plantes. Sans entrer dans l'examen physiologique des effets qu'elles éprouvent alors, nous nous bornerons à dire que l'abaissement de température, en diminuant le volume des cellules des vaisseaux et des canaux, affaiblit ou arrête tout à fait le mouvement de la séve; ainsi les jeunes pousses de chêne ne sont pas affectées sensiblement quand la température est à zéro, tandis que celles du mûrier et du figuier, ne pouvant résister à cette température, meurent.

On est convenu de prendre pour limite de la végétation d'une plante le degré de froid que l'arbre ou la plante peut supporter sans périr. Peu d'observations ont été faites pour déterminer avec exactitude ce point extrême dans quelques plantes. Cette détermination exige que l'on connaisse, non-seulement la température moyenne, mais encore les températures estivale et hibernale d'un grand nombre de lieux situés sur des méridiens différents. Ces données ne sont pas les seules qui doivent être prises en considération; il faut encore y joindre les effets physiologiques qui sont produits dans cette circonstance.

M. de Gasparin a fait à ce sujet une observation qu'il est utile de rappeler (*Cours d'agriculture*, t. II, p. 51) : « Il ne « suffirait pas de connaître l'abaissement de température « que peut supporter chaque arbre, pour expliquer sa mort : « il faudrait encore connaître la durée de cette température « extrême. Un moment suffit pour détruire le bourgeon « baigné de rosée ; il faut plus longtemps pour le ra- « meau ; le tronc ne périt qu'après une longue succession « de froid, la racine résiste presque toujours. Mais ce « qui rend plus difficile la détermination de ce degré ex- « trême, c'est que nous voyons les ravages du froid dé- « pendre souvent beaucoup plus des circonstances du « dégel que de l'intensité même du froid et de l'état des « cultures. »

Il importe encore de prendre en considération l'humidité de l'air. En effet, suivant M. de Gasparin, dans les années 1755, 1768 et 1811, un abaissement de température de — 12°,5 et — 10° ne produisit aucun effet fâcheux sur les oliviers, parce que le dégel eut lieu graduellement, à une basse température et avec de la pluie ; tandis qu'en 1709, la température en Provence étant descendue à — 14°, le dégel arriva subitement, les oliviers furent gelés.

On a remarqué, en général, que, lorsque le dégel a lieu subitement par un vent du sud, remplaçant le vent du nord, l'on perd la plus grande partie des oliviers. On peut donc considérer la rapidité du dégel comme une des causes principales du mal produit par le froid ; les cellules sont alors rompues, et leurs parties constituantes nagent dans le liquide.

La question, toutefois, est très-complexe ; car on a remarqué, dans quelques circonstances, que les arbres ou les plantes telles que les vignes sont plus fortement atteints dans les terrains humides que dans les terrains secs. D'autres fois le contraire a lieu. Ces effets opposés doivent être attribués aux circonstances du dégel et à la profondeur où la gelée s'est fait sentir. Si le terrain est humide et que le dégel soit lent, l'eau, ayant une basse

température, produit sur les racines le même effet que la neige sur un membre gelé. La gelée a-t-elle pénétré profondément, de manière à réagir sur les racines, celles-ci peuvent être détruites avant même le dégel.

L'effet produit par le froid sur les arbres dépend encore de la culture. Si l'on rompt la liaison des particules du sol par un labour, on diminue sa conductibilité pour la chaleur; dès lors, un labour fait avant l'hiver au pied des arbres, qu'on chausse en même temps, les préserve des effets résultant d'un abaissement extrême de la température. M. de Gasparin fait observer, à ce sujet, qu'en 1830 la plus grande perte des oliviers porta sur les arbres qui n'avaient pas été chaussés.

Après avoir exposé avec détail l'influence exercée par les agents extérieurs sur la végétation, il ne nous reste plus qu'à dire quelques mots des modifications que les plantes ont éprouvées de la part de ces agents.

Les botanistes s'accordent généralement à admettre qu'il y a eu, pour les végétaux, des centres distincts de création, mais avec cette condition que, sous les mêmes climats, dans l'ancien et le nouveau continent, on retrouve des espèces ayant entre elles de la ressemblance. Ces centres de création, ces germes primitifs, se sont dénaturés jusqu'à un certain point, par le transport d'une contrée dans une autre et par les changements apportés dans la culture.

Si l'on examine quelles ont été les modifications opérées dans les espèces végétales ainsi transportées, on trouve qu'elles n'ont produit que des variétés, car les espèces ne paraissent nullement changées; voici quelle est la nature de ces variations. La chaleur et l'humidité sont en général favorables au développement des êtres des deux règnes; les individus qui vivent sous cette double influence, portée à un certain maximum, tendent à devenir plus colorés et plus grands, caractères indiquant une vie plus active. Dans les végétaux qui sont transportés d'un climat dans un autre, les différences ne portent donc que sur la taille et la couleur. Il arrive quelquefois

que les espèces ne peuvent se propager, parce qu'elles ne trouvent pas dans leur nouvelle patrie toutes les conditions nécessaires à leur développement. D'autres fois, les fruits ne viennent pas à maturité quand la végétation est trop puissante; c'est pour ce motif que la vigne et le pêcher, transportés dans les régions équatoriales, prennent de grands développements sans produire de fruits.

Les végétaux peuvent bien être modifiés par la culture; mais, nous le répétons, il n'en résulte que des variétés, comme les arbres fruitiers en sont des exemples, variétés qui tendent à retourner à leurs types primitifs, quand elles ne végètent plus dans les conditions particulières où elles s'étaient produites.

§ II. — *Des animaux.*

La vie animale, pour se développer et se maintenir alors que les germes de tout genre ont été créés, exige des proportions de chaleur, de lumière, d'oxygène, de carbone, d'azote et d'eau qui varient suivant les classes et les espèces. Les animaux et les végétaux n'exigent pas les mêmes conditions physiques et chimiques; il en est de même des animaux, selon qu'ils vivent dans l'eau, sur la terre ou dans l'air; ils consomment plus d'oxygène et d'azote que les végétaux, qui exigent à leur tour une plus grande proportion de carbone. En outre, les animaux terrestres chez lesquels les fonctions de la nutrition sont plus développées, consomment plus d'oxygène dans un temps donné que les animaux aquatiques. Ceux-ci vivent dans un milieu qui renferme une quantité si petite d'oxygène, que les autres animaux ne tardent pas à être asphyxiés quand on les y plonge.

L'influence de la pesanteur n'est pas la même dans ces deux classes d'animaux : les corps perdant dans l'eau une partie de leur poids égale au poids du volume d'eau déplacé, il s'ensuit que lorsque les animaux à tissus mous, comme les poissons, sont hors de l'eau, ils s'affaissent de manière que les fonctions vitales ne tar-

dent pas à cesser. Les animaux dont les parties sont gélatineuses, comme les infusoires et les méduses, ne peuvent, en raison de cela, vivre dans l'air.

La vie organique, comme nous l'avons déjà dit, a dû, suivant toutes les probabilités, commencer dans les eaux. On est d'autant plus porté à admettre cette opinion, que les animaux terrestres, ayant des organes plus compliqués que ceux qui habitent les eaux, doivent être considérés comme ayant été créés postérieurement.

Les espèces animales, aussitôt après leur création, durent se disséminer sur la surface terrestre en vertu de diverses causes. Les oiseaux, les poissons et les cétacés, par la facilité avec laquelle ils se transportent d'un lieu à un autre, devinrent en quelque sorte cosmopolites. Ils furent arrêtés toutefois dans leur émigration par des limites de température qui ne sont pas les mêmes pour tous les animaux. Les reptiles et la plupart des mollusques se tinrent dans des localités particulières où ils pouvaient seulement trouver les conditions nécessaires à la vie. D'un autre côté, l'homme a puissamment influé sur la dissémination des animaux et des végétaux qu'il a soumis à ses besoins et à ses plaisirs : il a été chercher, par exemple, le cheval dans les steppes de l'Asie centrale.

Les eaux ont contribué aussi, par l'intermédiaire des glaces et des bois qui surnagent à leur surface, au transport d'un pays dans un autre d'insectes, de mollusques, de végétaux, etc.

Les courants marins ont dû intervenir également dans les émigrations des êtres. C'est ainsi que le Gulf-stream, dont il sera ultérieurement question, dépose, sur les côtes de nos continents, des débris d'arbres arrachés par les eaux sur les bords du Mississipi et qui renferment des œufs d'insectes, de mollusques et de poissons.

Les oiseaux voyageurs déposent, dans les diverses contrées qu'ils parcourent, les œufs d'insectes dont ils ont fait leur nourriture et qu'ils n'ont pas digérés. L'air,

enfin, transporte au loin les semences très-légères de certaines plantes.

On a souvent attribué à un effet de création spontanée l'apparition d'espèces animales et végétales dans une contrée où elles étaient inconnues, alors qu'on aurait pu invoquer quelques-unes des causes que nous venons d'indiquer.

Les mers et les hautes chaînes de montagnes sont quelquefois des obstacles absolus à la dissémination des espèces terrestres; nous disons absolus, attendu qu'il y a un grand nombre d'animaux terrestres qui ne sauraient les franchir. C'est pour ce motif que la faune de l'Amérique tropicale est différente de celle de l'ancien continent sous les mêmes latitudes. On doit en excepter néanmoins les parties septentrionales des deux mondes, séparées l'une de l'autre par le détroit de Behring qui, n'ayant pas toujours existé, a pu probablement être franchi quelquefois, par les rennes, les ours blancs, les castors, habitant effectivement les parties septentrionales de l'Asie et de l'Amérique. Les continents opposent également des obstacles insurmontables aux animaux aquatiques, qui seraient obligés de traverser des régions plus ou moins chaudes, pour se rendre dans d'autres mers.

La configuration et la nature des côtes de la mer ont dû exercer jadis et exercent encore une grande influence sur le développement des mollusques, puisqu'il y a certaines espèces qui sont propres à telle ou telle localité.

De toutes les causes que nous venons d'indiquer, la température est sans aucun doute celle qui a le plus influé sur la dispersion et la propagation des espèces. Certains animaux, comme l'homme et le chien, peuvent supporter des températures extrêmes sans qu'il y ait danger pour leur vie, puisque nous les voyons habiter les régions polaires et les régions équatoriales; mais il en est d'autres, comme les singes, qui ne peuvent vivre dans un état parfaitement normal que sous les tropiques, et comme les rennes, qui ne trouvent que dans les ré-

gions septentrionales les conditions nécessaires à leur existence. L'émigration de quelques espèces est donc soumise à certaines conditions calorifiques.

Ce que nous venons de dire relativement aux différentes latitudes, s'applique également aux diverses zones de montagnes, depuis la base jusqu'au sommet. Nous citerons comme exemple le lama, qui vit au Chili et au Pérou à une hauteur de 4 ou 5000 mètres au-dessus du niveau de la mer, et qu'on ne rencontre jamais au bas des Cordillères, au Brésil et au Mexique.

Après les conditions de température, la nourriture est une de celles qui sont les plus essentielles au maintien de la vie. Le ver à soie, par exemple, ne peut exister que dans les pays où croît le mûrier, puisqu'il ne prend sa nourriture que sur les feuilles de cet arbre. La cochenille, également, ne peut vivre que dans les contrées où le cactus se montre. La flore d'un pays exerce donc une certaine influence sur sa faune. Quand une contrée à climat extrême, comme les régions polaires, manque d'une végétation suffisante pour la nourriture des animaux herbivores, les carnassiers ne pourraient l'habiter, car ils n'y trouveraient pas les moyens d'existence, à moins que ces carnassiers ne fussent ichthyophages.

L'influence de la température est telle sur le développement des êtres, que le nombre des espèces terrestres et marines va en augmentant des pôles à l'équateur. Dans les régions polaires, on ne trouve sur terre que des insectes, et dans les mers couvertes de glace qu'un très-petit nombre de poissons et de mollusques, et de crustacés. Ce nombre augmente à mesure que la latitude devient moindre, de sorte que la richesse des productions est en rapport avec la puissance de la chaleur et de la lumière. Cette puissance est telle, que plus on s'approche de l'équateur, plus on trouve d'animaux possédant l'organisation la plus compliquée et les facultés les plus développées, tels que les singes, les perroquets, les crocodiles et les tortues.

La chaleur et la lumière, sous les tropiques, parent les animaux des plus brillantes couleurs. L'influence de

leurs actions combinées est telle, que les animaux qui habitent les régions polaires dans les deux hémisphères ont entre eux une grande ressemblance, ainsi que les animaux qui habitent les régions tempérées sous les mêmes latitudes. Cette ressemblance, néanmoins, ne va pas jusqu'à une identité parfaite; il y a seulement un grand rapprochement dans les espèces; nous allons en donner quelques exemples. Les parties centrales de l'Inde et de l'Afrique renferment des singes qui ne sont pas précisément les mêmes que ceux que l'on trouve en Amérique sous la même latitude. Dans l'ancien continent vivent le lion, le tigre et la panthère : ces animaux sont remplacés en Amérique par le couguar, le jaguar et l'oncelot. Dans les montagnes de l'ancien et du nouveau monde on trouve des ours qui diffèrent très-peu les uns des autres. Ces exemples et d'autres que nous pourrions citer montrent que, dans les régions du globe placées sous les mêmes conditions climatériques, il existe des espèces plus ou moins voisines les unes des autres, et qui peuvent être considérées comme les représentants d'un seul et même type. Nous devons faire remarquer encore que, dans les deux mondes, les faunes présentent cette différence, que les mammifères de l'ancien sont plus grands que ceux du nouveau.

Dans l'Australie, on rencontre une faune encore inférieure, puisque les mammifères y sont représentés par des marsupiaux.

On ne saurait disconvenir, malgré les causes nombreuses qui ont concouru à l'émigration des espèces, que certaines localités ont dû avoir des centres particuliers de création. Les pays qui n'ont pas eu de communication ensemble ont pu conserver intacts ces centres primitifs; ainsi, dans la mer du Sud, la Nouvelle-Zélande et la terre de Van-Diémen, placées à peu près sous la même latitude, présentent cette particularité, que la faune de la première a des rapports avec celle des bords de la Baltique, tandis que celle de la terre de Van-Diémen se rapproche de celle des régions équatoriales

et renferme ces animaux si singuliers de la Nouvelle-Hollande.

Il est à remarquer que plus les îles sont récentes, moins la faune et la flore paraissent riches; on cite, à ce sujet, les îles de la Sonde et les îles voisines placées vers les régions équatoriales, où la faune et la flore sont très-riches sous tous les rapports, tandis que sous la même latitude, dans la mer du Sud, en s'approchant de l'Amérique, comme dans les îles de la Société, que l'on regarde comme de nouvelle formation, rien de semblable ne se présente; la faune et la flore y sont très-pauvres.

Les conditions de chaleur et d'humidité propres au développement des végétaux le sont également à celui des animaux; elles favorisent leur grandeur et leur couleur; c'est pour ce motif que la faune des régions équatoriales de l'Amérique, du continent indien et des archipels qui l'avoisinent est extrêmement riche et nous présente ces animaux dont les couleurs sont si brillantes.

En Afrique, dans les parties les plus chaudes où l'humidité n'est pas sensible, on trouve peu d'animaux à couleur brillante. En général, plus les conditions de chaleur et d'humidité diminuent, moins on trouve des espèces de grande taille et colorées.

En comparant ensemble les animaux transportés d'un climat dans un autre, on ne trouve dans les individus que des variations dépendant de la grandeur et de la couleur, en exceptant toutefois les changements dus à la domesticité et à leurs nouvelles habitudes, ou bien les modifications que leur pelage éprouve afin qu'ils puissent résister à la rigueur du climat; mais lorsque ces animaux reviennent à l'état sauvage, ces modifications disparaissent de génération en génération, et il y a retour à leur type primitif. Les chevaux devenus sauvages recouvrent leur poil fauve et frisé; les cochons transportés en Amérique et rendus accidentellement à la liberté reprennent peu à peu la forme des sangliers.

Quant aux variations de pelage, elles peuvent se résumer ainsi. Tous les animaux à l'état sauvage ont deux sortes de poils, des poils soyeux et des poils laineux. Les chiens domestiques et les moutons offrent les deux cas extrêmes et opposés : le chien n'a conservé que des poils soyeux, tandis que le mouton les a tous perdus. Le chien de la Nouvelle-Hollande présente toutefois encore des poils laineux ; aussi le considère-t-on comme le plus rapproché du chien primitif.

Si la domesticité produit les changements de pelage dont nous venons de parler, les changements de climat donnent lieu à des effets analogues. Dans les pays chauds, ils perdent peu à peu leur laine, et leur corps se couvre d'un poil soyeux et long ; dans les régions froides, le contraire a lieu : ils perdent peu à peu leur poil soyeux, et leur poil laineux prend plus de développement pour résister à la rigueur du climat.

On n'a donc observé jusqu'ici en réalité que des variations constituant des races d'individus et nullement des changements d'espèce.

CHAPITRE III.

DES MERS.

SECTION Ire.

De l'étendue des mers et des propriétés physiques des eaux.

§ Ier. — *Étendue et profondeur.*

Aussitôt que la température de la terre fut suffisamment abaissée pour que l'eau pût se maintenir à l'état liquide, une grande partie des vapeurs aqueuses qui se trouvaient dans l'atmosphère abandonnèrent l'état élastique pour se précipiter sur la terre. Les eaux dont la température était encore très-élevée s'écoulèrent de tous les points de la surface terrestre, pour se rendre dans les parties les plus basses, en ravinant les terrains et dissolvant toutes les substances susceptibles de l'être. Les premières mers formées et les grands cours d'eau se chargèrent de sels, et très-probablement d'acides, qui saturèrent les bases libres. Lorsque la surface de la terre eut acquis un relief suffisant, les marées cessèrent de pénétrer dans l'intérieur des continents, et les fleuves diminuèrent peu à peu.

A l'époque actuelle, la surface du globe nous présente deux grands continents et des îles nombreuses, qui forment le quart environ de la superficie; puis des mers et des lacs intérieurs, qui en couvrent les trois quarts.

La superficie de la terre est évaluée à 5100000 myr. carr.
Celle des mers et des lacs.........3700000
Celle des terres et des îles.........1400000

Il existe une plus grande étendue de terres au nord qu'au midi; pour les mers, c'est l'inverse. Leur rapport est de 8 à 5.

Les terres et les mers sont ainsi réparties (*Mer, dictionnaire des sciences naturelles*, C. Prévost) :

Zone glaciale N., on compte sur 1000 myr. c.		Terre	400,	Mer	600.
Zone tempérée N.	id.	T.	559	M.	441.
Zone torride N.	id.	T.	197	M.	803.
Zone torride S.	id.	T.	312	M.	688.
Zone tempérée S.	id.	T.	75	M.	925.
Zone glaciale S.	id.	T.	0	M.	1000.

Les deux continents n'ont pas la même direction. L'Amérique s'étend d'un pôle à l'autre; l'ancien continent, au contraire, se prolonge dans un sens à peu près parallèle à l'équateur. La partie méridionale de l'Afrique fait seule exception.

Les grandes pointes des continents sont tournées vers le sud; l'Amérique, l'Afrique, les presqu'îles de l'Inde, le Kamtschatka, la Californie, les Florides et le Groënland en sont des exemples. Cet état de choses ne semble-t-il pas indiquer de grandes débâcles dans la même direction?

Les grandes chaînes de montagnes présentent une direction analogue à celle des continents : les Cordillères en Amérique, l'Altaï et l'Himalaya en Asie, mettent ce fait en évidence.

Les lacs et les grands amas d'eau affectent une semblable orientation. La mer Noire, la mer Caspienne, la mer de Marmara, sont dirigées de l'est à l'ouest.

Dans un grand nombre de lieux, les rivages opposés d'un même canal ont la même constitution géologique. Les couches de terrains se correspondent parfaitement, ce qui annonce que le bras de mer intermédiaire est le résultat d'une rupture qui a séparé les deux terres. Nous citerons les côtes de France et d'Angleterre, celles de la Méditerranée et de l'Adriatique.

Les îles, souvent disposées par lignes et formant des groupes, sont également composées des mêmes terrains, comme si elles avaient formé jadis un seul tout.

Les continents s'abaissent ordinairement vers les mers graduellement, mais souvent aussi leur pente est ra-

pide. Le point le plus élevé dans ce dernier cas est rarement le plus éloigné de la mer. C'est en effet ce que l'on observe en Amérique, en Espagne et en Scandinavie.

Nous ignorons quelle est la configuration du fond des mers, mais tout porte à croire qu'elle doit avoir le plus grand rapport avec celle des continents; elle doit présenter, comme celle-ci, des vallées, des plaines et des montagnes, dont les sommités forment les îles. Pour se rendre compte de cette similitude, il faut se rappeler le mode de formation de la surface de la terre; formation qui est le résultat de plissements qui ont dû agir dans les parties supérieures comme dans les parties inférieures.

Les observations des navigateurs ont appris que, dans le voisinage des falaises et des côtes escarpées, la profondeur de la mer est considérable, tandis que, près des côtes basses et en pentes douces, elle augmente lentement.

Le docteur Young donne à l'océan Atlantique une profondeur moyenne d'environ 1000 mètres, et à l'océan Pacifique 4000 mètres. Dans le plus grand nombre de cas, la sonde rencontre le fond de la mer à 3 ou 400 mètres; dans la pleine mer, elle descend jusqu'à 1000 ou 1200 mètres.

Il est nécessaire de donner ici quelques déterminations, pour bien fixer les idées:

M. le capitaine Dupetit-Thouars, pendant son voyage sur la frégate *la Vénus,* de 1836 à 1839, a fait deux déterminations de profondeur d'un grand intérêt dans l'Océan méridional : l'une par 57° 0' de latitude australe et 55° 7' de longitude occidentale, à 185 lieues marines dans l'ouest et 8° sud du cap Horn; le plomb est descendu, sans toucher le fond, à 2411 brasses, ou un peu plus de 4000 mètres.

La deuxième détermination a été faite dans le Grand océan équinoxial, par 4° 32' de latitude boréale et par 136° 56' de longitude occidentale, à 230 lieues mari-

nes au sud des îles Bunker ; la sonde est descendue jusqu'à 3790 mètres.

Dans les mers polaires loin des côtes, Scoresby a descendu la sonde, par 76° et 77° de latitude N., jusqu'à 2200 mètres, sans rencontrer le fond ; la profondeur y est donc considérable. Les mers d'Europe ne sont pas regardées comme aussi profondes que les précédentes.

Quant à la Méditerranée, sa profondeur est très-inégale : le capitaine Smith a trouvé, entre Ceuta et Gibraltar, 1740^{m}; et 293 à 915 mètres, dans les parties les plus resserrées du détroit. A Nice, d'après de Saussure, elle est de 990 mètres. Dans la mer Adriatique, elle est beaucoup moindre. Enfin, entre les côtes de la Dalmatie et l'embouchure du Pô, elle n'est que de 44 mètres.

La profondeur de la mer est donc du même ordre de grandeur que les élévations des continents au-dessus du niveau moyen; d'après cela, on est porté à croire qu'au maximum, elle ne surpasse pas 5000 mètres, laquelle correspond aux plus hautes montagnes, si l'on en excepte toutefois l'une des cimes de l'Himalaya, qui est élevée de 7821 mètres au-dessus du niveau de la mer.

En résumé, la masse totale des eaux, à la surface de la terre, n'excède pas en moyenne une couche liquide qui aurait 1000 mètres d'épaisseur et qui couvrirait tout le globe. C'est tout au plus le $\frac{1}{40}$ de l'écorce consolidée, et pas même $\frac{1}{6000}$ du rayon terrestre. Ainsi de même que, par rapport à la terre, les inégalités des montagnes semblent insensibles, de même aussi la masse de l'Océan est une fraction très-minime de la masse du globe.

§ II. — *Du niveau des mers.*

Toutes les mers communiquent ensemble, à l'exception toutefois des mers intérieures, et elles ont un niveau moyen général qui, prolongé, constitue ce que l'on nomme la surface des eaux tranquilles; la Méditerranée et les golfes présentent quelques exceptions dont nous allons donner des exemples.

Les eaux du Zuyderzée sont plus élevées que celles de la mer du Nord; il en est de même de celles de la mer Rouge à l'égard de la Méditerranée. La mer Rouge d'après le nivellement de l'isthme de Suez par Lepère, pendant l'expédition française en Égypte, paraît avoir un niveau au-dessus de la Méditerranée, à l'instant de la marée haute, de 9^m,9, et de 8^m,12 à la marée basse; cependant ces deux mers communiquent ensemble avec le Grand-Océan, l'une par le détroit de Bab-el-Mandeb, l'autre par le détroit de Gibraltar. On a attribué cette différence de niveau à l'accumulation des eaux dans la mer Rouge, par le mouvement général de l'Océan de l'est à l'ouest.

Dans la Baltique et la mer Noire, le niveau change avec les saisons. Il s'élève au printemps, quand les fleuves y apportent une grande masse d'eau.

M. de Humboldt avait annoncé, d'après des observations barométriques faites à Cumana, à Carthagène, à la Vera-Cruz, à Acapulço et à Callao, que les eaux de la mer du Mexique avaient un niveau de 3 mètres au-dessus de celui de la mer du Sud, quoique ces deux mers fussent en communication. MM. Lloyd, ingénieur anglais, et Falmarc, capitaine suédois, ont recommencé les observations en 1828 et en 1829, et ont été conduits aux conséquences suivantes :

1° Le niveau moyen de l'océan Pacifique à Panama est de 1^m,1 plus haut que le niveau moyen de l'océan Atlantique à Chagres;

2° Au moment de la haute mer, l'Océan, sur la côte occidentale de l'isthme, est de 4^m,13 plus haut que sur la côte orientale ;

3° Enfin, au moment de la basse mer, sur les mêmes côtes, l'océan Pacifique, au contraire, est plus bas que l'océan Atlantique de 1^m,98.

Il est prouvé par là que le niveau moyen de la mer du Sud est plus élevé que le niveau moyen de l'océan Atlantique, de 11 décimètres, contrairement à ce qu'avait annoncé M. de Humboldt.

La mer Caspienne, d'après le dernier travail de M. Hommaire de Hell (*Comptes rendus*, t. XVI, p. 738), a un niveau de $18^m,3$ au-dessous de celui de la mer d'Azoff. Cette différence peut être attribuée, soit à un affaissement du sol, soit, ce qui paraît le plus probable d'après ce travail, à la diminution des eaux qui occupaient peut-être jadis une plus grande étendue, comme tend à l'indiquer la position du lac ou de la mer d'Aral, qui paraît en être un démembrement, ainsi que la configuration et la constitution des terrains qui enveloppent cette mer, lesquelles présentent encore la position des anciens rivages.

La mer Morte est de 427^m au-dessous de la Méditerranée (le lieutenant Symons, *Comptes rendus*, t. XIII, p. 884).

La différence de niveau des mers intérieures peut être attribuée à plusieurs causes : 1° à l'écoulement qui n'est pas proportionné avec la quantité d'eau reçue ; 2° à l'inégale évaporation ; 3° aux marées et aux courants marins ; 4° aux vents : ainsi la Méditerranée, qui n'a pas de marées sensibles, loin de l'Océan ; s'élève quelquefois, sous l'action de certains vents, de plusieurs décimètres.

On admet, en général, que le niveau moyen des grandes mers ne change pas, quoique plusieurs géologues pensent que ce niveau s'abaisse constamment, et d'autres qu'il s'élève. Des expériences ont été faites pour reconnaître cette variation. Celsius et Linnée, en 1734, établirent des repères fixés sur les bords de la Baltique, et crurent remarquer un abaissement de $0^m,18$ en 13 ans ; d'autres repères en indiquèrent un autre de $0^m,18$ en 25 ans. M. de Buch, qui admet le changement de niveau, l'attribue à un exhaussement des rives. Il est à présumer que ces changements tiennent à un phénomène général qui se manifeste sur tout le globe, et qui fait varier, très-lentement il est vrai, mais continuellement, la configuration de sa surface, en donnant lieu tantôt à des élévations, tantôt à des abaissements de terrains. Dans

quelques contrées, il paraîtrait même que les terrains ont été élevés, abaissés, puis relevés à plusieurs reprises, c'est-à-dire qu'ils ont éprouvé des oscillations séculaires. Il ne peut en être autrement dans la croûte solide qui repose sur une masse liquide incandescente, soumise à un refroidissement graduel ; la configuration de la surface et les inégalités ne doivent pas rester toujours les mêmes.

§ III.— *De la température des mers et des lacs.*

Depuis un certain nombre d'années, les navigateurs s'occupent de la détermination de la température des mers à leur surface et à différentes profondeurs, sous diverses latitudes. La température de l'air à la surface de la mer étant liée à la température de celle-ci, nous en parlerons d'abord. Voici les résultats généraux auxquels on est parvenu.

Température de la mer à sa surface.

En mer, à de grandes distances des côtes, l'air éprouve, dans le cours de la journée, des variations moins grandes que sur les continents, en raison de l'uniformité du milieu ambiant; mille causes, en effet, sur la terre font varier le rayonnement de la chaleur; les corps s'échauffent inégalement, et conservent pendant plus ou moins de temps la chaleur acquise, qu'ils communiquent ensuite à l'air. En mer, il n'en est pas ainsi; l'évaporation qui s'opère à la surface est une cause incessante d'abaissement de température qui diminue l'amplitude des variations diurnes.

Dans les mers équatoriales, la différence entre le maximum et le minimum du jour ne va pas au delà de 1° à 2°, tandis que sur les continents elle s'élève à 5° ou 6° et au delà. Dans les régions tempérées, c'est-à-dire de 25° à 50° de latitude, la différence en mer dépasse rarement 2° à 3°, tandis que cette différence sur terre, comme à Paris, va quelquefois jusqu'à 12° à 15°. La température minimum est comme à terre au soleil le-

vant, et la température maximum paraît avoir lieu aux environs de midi, au lieu de deux à trois heures. Nous avons déjà mentionné ce fait, à propos des régions situées près de la mer (pag. 82).

En comparant la température de l'air à celle de la mer, à sa surface, on trouve qu'entre les tropiques, la température de l'air est en général moins élevée que celle de la mer. Le capitaine Duperrey, dans son voyage de circumnavigation, a fait 1850 observations entre 0° et 20° de latitude, de quatre heures en quatre heures, desquelles il résulte que la mer a été 1371 fois plus chaude que l'air, et l'air seulement 479 fois plus chaud que la mer.

Voici, du reste, un tableau que nous devons à l'obligeance de ce savant navigateur, et qui exprime les températures de l'air et de l'eau à la surface de la mer, dans toute l'étendue, en longitude, comprise entre 10° de latitude nord et 10° de latitude sud.

Les températures sont les moyennes des températures moyennes diurnes, c'est-à-dire, des moyennes prises chaque jour entre toutes les indications observées jour et nuit à des intervalles de temps égaux et très-rapprochés. Toutes ces observations ont été faites en pleine mer. M. le capitaine Duperrey a divisé la zone équatoriale du Grand-Océan en trois parties longitudinales, par la raison que le courant polaire d'eau froide qui marche vers l'ouest, à partir des côtes du Pérou, gagne en température au fur et à mesure qu'il se rapproche du Grand-Archipel d'Asie. C'est la moyenne des températures de ces trois régions qui peut donner une idée exacte de la température de la zone dont les limites sont 10° de latitude nord et 10° de latitude sud.

OCÉAN ATLANTIQUE.	TEMPÉRATURES CENTIGR. de L'AIR.	de LA MER.
La corv. *l'Uranie*, entre 24° et 35° de long. O.	25°,44	25°,83
» *la Coquille*, entre 15° et 32° » »	25 ,07	25 ,30
» *le Blossom*, entre 25° et 36° » »	24 ,82	25 ,94
La frég. *la Vénus*, entre 14° et 36° » »	26 ,27	26 ,37
Température définitive......	25°,40	25°,86
GRAND-OCÉAN (partie orientale).		
La corv. *la Coquille*, entre 81° et 91° de l^s. O.	24°,47	23°,71
» *le Blossom*, entre 100° et 108° » »	26 ,75	27 ,24
La frég. *la Vénus*, entre 99° et 108° » »	26 ,14	26 ,27
Température définitive......	25°,79	25°,74
GRAND-OCÉAN (partie centrale).		
La corv. *l'Uranie*, entre 142° et 168° de l^s. O.	26°,48	26°,36
» *le Blossom*, entre 148° et 153° » »	27 ,03	27 ,53
Température définitive......	26°,76	26°,95
GRAND-OCÉAN (partie occidentale).		
La corv. *l'Uranie*, entre 120° et 147° de l^s. E.	27°,63	28°,40
» *la Coquille*, entre 96° et 175° » »	28 ,27	28 ,69
Température définitive......	27°,95	28°,55
En prenant la moyenne des températures obtenues dans les trois portions de la zone qui appartient au Grand-Océan, on trouve..	26°,83	27°,08

Nous devons faire observer que dans les zones de 10° à 20° de latitude nord, et de 10° à 20° de latitude sud, les températures de l'air et de la mer sont généralement plus élevées que dans la zone équatoriale. En général, les eaux les plus froides des tropiques sont celles qui coulent sous l'équateur même.

Dans les régions tempérées, l'air est rarement plus chaud que la surface de l'eau. Dans les régions polaires, on n'a pas d'exemple que l'air soit plus chaud que la mer; il est toujours plus froid.

Température de la mer à diverses profondeurs.

Pour évaluer ces températures, on fait usage des thermomètres à *minima* dont nous avons parlé p. 30.

Afin de montrer comment cette température varie avec la profondeur, nous rapportons dans le tableau ci-après les déterminations de températures sous-marines faites dans le voyage de *la Vénus*, sous la direction de M. Dupetit-Thouars, à des profondeurs verticales variant de 30 à 1150 ou 2000 brasses. Quand l'étui en cuir qui renfermait les thermométrographes avait à subir des pressions de 3 à 400 atmosphères, l'étui et les instruments revenaient à la surface entièrement aplatis.

Ces observations ont été faites, d'une part, depuis 12° 39′ jusqu'à 48° 47′ de latitude sud, et de l'autre, depuis 4° 23′ jusqu'à 51° 34′ de latitude nord.

Ces résultats nous montrent que les sondes ont souvent donné, pour la température de la mer à de grandes profondeurs, dans les régions tempérées comme dans les régions intertropicales, des nombres tels que + 3°,6; + 3°,2; + 3°; + 2°,8 et + 2°,5, quand la surface indiquait une température de 26° à 27°. Ces déterminations, faites avec beaucoup de soin, ne doivent pas surprendre, car les dissolutions salines, comme l'a prouvé M. Despretz, ont un maximum de densité comme l'eau ordinaire; seulement, dans celle-ci, ce maximum est + 4°, tandis que, dans l'eau de mer, il est à peu près de —3°,6 et au-dessous du point de congélation, qui,

DATES.	LATITUDE.	LONGITUDE.	PARAGES.	PROFONDEUR en BRASSES.	TEMPÉRAT. à cette PROFONDEUR.	TEMPÉRAT. de la SURFACE.
1837 26 février.	38°12' S.	56° 0O.	Océan Atlantique, par le travers de la Plata.	37	3°,0	16°,8
				70	5 ,2	14 ,0
				40	5 ,8	14 ,0
5 mars.	45 38 S.	63 30O.	» » au nord des îles Malouines.	30	9 ,0	14 ,2
				70	5 ,2	14 ,8
				500	4 ,1	13 ,2
16 avril.	48 47 S.	81 26O.	» Pacifique, par le travers de Chiloe.	1110	2 ,3	13 ,0
24 avril.	33 26 S.	74 23O.	» » près de Valparaiso.	160	9 ,5	12 ,6
22 mai.	13 50 S.	79 1O.	» » près de Pisco.	130	13 ,0	18 ,3
23 mai.	12 39 S.	79 27O.	» » »	128	13 ,2	19 ,9
9 juillet.	21 6 N.	158 19O.	» » près des îles Sandwich.	100	13 ,0	25 ,0
19 août.	41 42 N.	160 22E.	» Pacifique.	170	5 ,1	12 ,0
18 septembre.	51 34 N.	159 21E.	» » au sud des îles Aleutiennes.	1080	2 ,5	11 ,7
1838 30 septembre.	26 53 N.	176 51O.	» » au nord des îles Kermadec.	1000	5 ,6	19 ,3
7 octobre.	32 51 S.	174 22E.	» » au nord de la Nouvelle-Zélande.	880	5 ,4	16 ,3
14 novembre.	34 37 S.	168 41E.	» » » » »	550	6 ,0	17 ,0
19 novembre.	34 34 S.	158 42E.	» » entre le port Jackson et la Nouvelle-Zélande.	630	4 ,9	18 ,3
1839 17 janvier.	43 2 S.	129 34E.	» » au sud de la Nouvelle-Hollande.	1100	5 ,1	13 ,0
23 janvier.	39 4 S.	121 2E.	» » » » »	350	8 ,6	16 ,0
27 janvier.	36 36 S.	116 8E.	» » pres du port du roi George.	990	2 ,8	17 ,9
1 février.	37 42 S.	112 38E.	» » au sud du cap Leeuwin.	990	3 ,0	16 ,7
11 février.	27 47 S.	98 0E.	Mer des Indes, à l'est de la baie des Chiens-Marins. . . .	990	2 ,8	23 ,8
23 mars.	31 33 S.	31 10E.	Canal de Mozambique.	900	4 ,2	24 ,0
26 avril.	29 33 S.	8 34E.	Océan Atlantique, pres du Cap de Bonne-Espérance.	1150	3 ,1	19 ,0
27 avril.	26 36 S.	5 12E.	» » » » »	1000	3 ,6	20 ,0
1 mai.	25 10 S.	5 39E.	» » » » »	1000	3 ,0	19 ,6
8 mai.	15 54 S.	8 3O.	» » près de Sainte-Hélène.	200	12 ,0	23 ,6
24 mai.	4 23 N.	28 26O.	» » près du Penedo de San-Pedro.	1130	3 ,2	27 ,0

dans l'état d'agitation, peut être évalué à — 2°, 5 (*Annales de physique et de chimie*, tom. LXX, p. 52). Ce maximum de densité s'abaisse à mesure que l'eau se charge de sel.

Sous les tropiques, la température de la surface de la mer restant presque continuellement à 26° ou 27°, on attribue la température des régions inférieures à des courants sous-marins qui portent l'eau froide des pôles vers l'équateur. Nous verrons en effet, dans les paragraphes suivants, que la surface des mers est sillonnée de courants qui transportent l'eau chaude de l'équateur vers les régions polaires; il est donc probable que des contre-courants en sens inverse amènent l'eau froide des pôles à l'équateur. Ces courants, du reste, doivent être modifiés par diverses causes, telles que la profondeur des bassins des mers, leur configuration, les marées, les vents, etc.

Nous venons de voir que la température diminuait dans la mer à mesure que la sonde parvenait à une plus grande profondeur. Dans les mers tempérées, entre 30° et 70° de latitude, il en est de même. Seulement la température décroît d'autant moins que la latitude devient plus grande, et près de 70° de lat. elle commence à devenir croissante, puis elle l'est toujours dans les mers polaires. Il doit donc exister une zone présentant une température constante depuis la surface jusqu'à une très-grande profondeur. Nous citons, page suivante, quelques-uns des résultats obtenus par Scoresby dans les mers polaires, pour montrer la distribution de la température dans ces parages (*Annales de physique et de chimie*, tom. XVIII, p. 26). Pour que l'équilibre puisse exister dans ces masses liquides avec une température croissante en même temps que la profondeur, il est nécessaire que la densité des couches soit également croissante; on est donc conduit à supposer qu'à la surface de la mer, le mélange de l'eau salée et de l'eau qui provient de la fusion des glaces, n'acquiert pas cependant par le refroidissement une densité plus considérable que celle

qui est à une certaine profondeur, à moins que la compression ne donne lieu à une augmentation de densité, capable d'équilibrer la diminution due à l'élévation de température. Comme les observations n'ont pas encore confirmé la première hypothèse, il est nécessaire d'examiner si la seconde est possible. Or, l'eau se comprime

LATITUDE.	LONGITUDE.	PROFONDEUR transformée EN MÈTRES.	TEMPÉRATURE à diverses profondeurs.	TEMPÉRATURE de l'air.
76°16' N.	9°0' E.	mètres. 0 91,4 285 420	—1°,8 —0 ,1 +1 ,0 +0 ,7	—11°,0
77°15' N.	8°10' E.	0 36,6 73,2 109,8 182,8	—1°,5 —1 ,5 —1 ,5 —1 ,1 —1 ,1	—8°,9
78°2' N.	0°10' O.	0 1391	—0°,0 +3 ,3	+2°,2

de 46 millionièmes par chaque atmosphère ou par 10 mètres d'eau, et les variations de volume de ce liquide dans les environs de 0°, ne portent également que sur les millionièmes; ainsi, par exemple, en passant de 1° à 0°, l'eau augmente de 50 millionièmes de son volume. Il résulte, de là, que la compression seule de l'eau de mer par les couches supérieures, peut donner lieu à une augmentation de densité capable de faire équilibre à la dilatation; dès lors rien ne s'oppose à ce que les couches inférieures aient une température plus élevée que celle de la surface.

Nous ne devons pas oublier de mentionner le fait observé par Jonathan William, savoir, que l'eau est plus froide sur les hauts-fonds qu'en pleine mer; fait qui a

été confirmé par MM. de Humboldt et John Davy. Sir Humphry Davy attribuait ce curieux phénomène, non à des courants sous-marins qui, arrêtés dans leur marche, remonteraient le long des accores du banc et glisseraient ensuite à sa surface, mais au rayonnement, par suite duquel, surtout quand le ciel est serein, les couches supérieures de l'Océan doivent certainement se refroidir beaucoup. Or, le refroidissement, si ce n'est dans les régions polaires où la mer est à près de zéro de température, amène une augmentation de densité et un mouvement descendant des couches refroidies. Supposez un océan sans fond; les couches en question tombent jusqu'à une grande distance de la surface, et doivent en modifier très-peu la température; mais sur un haut-fond, lorsque les mêmes causes agissent, les couches refroidies s'accumulent, et leur influence peut devenir très-sensible.

Dans les mers méditerranées, la distribution de la chaleur doit se faire comme dans l'Océan; seulement, la profondeur étant moins considérable, on parvient à une température stationnaire dont il est aisé de se rendre compte. Pour donner un exemple des effets de chaleur que l'on y observe, nous ne pouvons mieux faire que de citer les conclusions auxquelles conduisent les observations de M. Aimé sur la température de la Méditerranée (*Annales de physique et de chimie*, 1845, t. XV), faites à l'aide de thermométrographes et de thermomètres à déversement avec échelle arbitraire, garantis de la pression extérieure au moyen de tubes en verre.

1° Près des côtes, la température à la surface de la Méditerranée est notablement plus élevée qu'au large pendant le jour, et plus basse quelquefois pendant la nuit; près des côtes de l'Océan, c'est l'inverse.

M. Aimé pense donc, d'après cela, que le fait observé par Jonathan William est dû aux courants sous-marins: ainsi, d'après lui, lorsque l'eau est peu profonde, dans le jour, les rayons solaires pénétrant jusqu'à une certaine profondeur peuvent échauffer le fond même de la mer.

2° La température moyenne de l'année, à la surface, est à peu près égale à celle de l'air.

Au printemps et en été, la température moyenne de la mer est inférieure à celle de l'air; en automne et en hiver, c'est le contraire.

Jamais la température de la surface ne descend au-dessous de 10° en hiver; en été, elle peut aller jusqu'à 26°.

3° La variation diurne de la température cesse d'être sensible à 16 ou 18 mètres, et la variation annuelle à 300 ou 400 mètres.

Quelquefois, par un temps calme et serein, il se passe dans la mer un phénomène analogue à celui qui a lieu dans l'air. Le matin, on observe une inversion dans la température des couches d'eau, qui va en croissant de 3 à 4 dixièmes de degré, jusqu'à la profondeur de 2 ou 3 mètres.

4° La température minimum des couches profondes de la Méditerranée est égale à la moyenne des températures de l'hiver à la surface.

Dans la partie méridionale, la température décroît généralement toute l'année jusqu'à 3 ou 400 mètres. Dans la partie septentrionale, au contraire, la température augmente en hiver jusqu'à une certaine profondeur.

La température des couches profondes de la Méditerranée peut être évaluée à peu près à 12°,6, d'après les observations de M. Aimé et celles de M. Bérard en divers points de cette mer.

M. Bérard a trouvé en effet :

	Profondeur.	Température.
Près des côtes de France	....1233 m.	....12°,6
— d'Espagne	1000	....12 ,6
— des Baléares	...2000	....12 ,7
	...1000	....12 ,4
Près des côtes de l'Algérie	...1201	....12 ,9
La température moyenne est		....12°,6

Or, comme la température moyenne hibernale, à la surface de la mer, est de 11°,7 à Toulon, et 13°,8 à Alger, la moyenne de ces deux nombres est 12°,75, qui est précisément la température précédente. Il est donc probable que la basse température du fond de la Méditerranée n'est pas déterminée par l'entrée des eaux de l'Océan, mais seulement par la précipitation des couches supérieures refroidies pendant l'hiver.

De la température des lacs.

Les couches supérieures des lacs éprouvent des variations de température considérables, et telles qu'en hiver elles peuvent se congeler, tandis qu'en été leur température peut aller à 20° ou 25°. Les parties inférieures ont une température peu variable et qui approche du *maximum* de densité de l'eau ordinaire, c'est-à-dire, de +4°. Ce fait a été mis hors de doute par les expériences de Saussure en Suisse, et par celles que l'un de nous (M. Becquerel) a faites dans le lac de Genève, près du château de Chillon, avec un appareil thermo-électrique.

EXPÉRIENCES FAITES DANS LE LAC DE GENÈVE PRÈS DU CHATEAU DE CHILLON.

Profondeur.	Température.
104 mètres	6°,50
80	6,50
60	7,60
40	9,00
20	12,30
A la surface	19,80

L'appareil thermo-électrique a l'avantage, sur les thermomètres à *minima*, de donner des effets instantanés au fur et à mesure qu'on descend l'appareil.

Saussure avait trouvé dans le lac de Genève, à 104 mètres, +5°,60; la température de 6°,50, trouvée à Chillon, tient à ce que l'on a opéré près d'un rocher; ce qui le prouve, c'est que Saussure, sous un climat plus doux, dans le lac Majeur, a trouvé 6°,75 à 112 mètres.

Voici comment s'opère la distribution de la température dans les lacs. Dans les lacs de Suisse, il se rend continuellement des eaux provenant de la fonte des neiges, qui, en raison de leur densité, occupent leurs parties inférieures. Pendant l'été, les couches supérieures participent seules à l'échauffement solaire, l'agitation de l'air ne se faisant sentir qu'à une certaine profondeur, par la raison qu'elles sont soutenues au-dessus des couches inférieures, en vertu d'une densité moindre. Vers la fin de l'automne, la température doit être sans cesse décroissante. Dans la saison froide, le refroidissement de la couche supérieure est dû au contact de l'air froid et au rayonnement nocturne; l'eau acquiert par là une densité plus grande que les couches qui sont au-dessous et avec lesquelles elle se mêle en tombant. Le *maximum* de densité de l'eau pure étant de + 4°, au lieu d'être au-dessous de zéro comme dans l'eau salée, et l'eau des lacs ne renfermant que peu de matières salines, il en résulte que la température du fond des lacs s'approche sans cesse de + 4°, et ne peut être plus basse que cette température.

§ IV. — *Des glaces polaires.*

La température allant en décroissant, de l'équateur aux pôles, il en résulte que les régions polaires, qui ne reçoivent que les rayons obliques du soleil, et qui sont privées pendant six mois des rayons directs, ont une température inférieure à celle de la congélation de l'eau; il y règne un froid très-intense, qui s'étend à une certaine distance autour des pôles.

Dans l'hémisphère nord, la limite des glaces permet d'avancer jusque vers le 79e ou le 80e degré de latitude, tandis que, dans l'hémisphère sud, les bancs de glace se déplaçant continuellement, et les navigateurs n'ayant pu s'avancer que dans les solutions de continuité que laissent entre eux ces bancs, il s'ensuit qu'ils ont évalué diversement la limite des glaces polaires. Nous renvoyons le lecteur à la page 109, où on a déjà traité de la

température des pôles. On a estimé approximativement l'étendue des glaces australes à peu près à 6 fois celle des glaces du nord; mais, d'après ce qui précède, on ne sait pas au juste si ce rapport est exact.

On distingue, dans les régions polaires, la glace d'eau douce et la glace d'eau de mer; celle-ci, quoique composée d'eau douce, puisque la congélation opère la séparation du sel et de l'eau, est poreuse, opaque, en fragments et moins pesante que la glace d'eau douce. L'homogénéité et la transparence de cette dernière est telle, que le capitaine Scoresby (*Annales de physique et de chimie*, t. V, p. 63) a pu se servir de fragments, dont la convexité même n'était pas très-régulière, comme de lentilles de verre limpide, à l'aide desquelles il a enflammé des corps combustibles placés au foyer.

Lorsqu'on arrive dans les régions polaires, on trouve que la mer est couverte d'amas de glaces, auxquels on a donné le nom de *champs de glace*, qui s'élèvent de 2 à 3 mètres au-dessus de la mer, s'enfoncent de 6 mètres au-dessous, et qui ont quelquefois une étendue de 15 lieues. Ces champs de glace ne restent pas toujours entiers : ils se divisent, les fragments s'amoncellent et donnent lieu à des chaînes beaucoup plus irrégulières que les premières. On sait d'après M. Scoresby, dont les voyages ont contribué à faire connaître les particularités de ces phénomènes, que la glace peut se former en pleine mer; et même, lorsque, dans un endroit, les cristaux apparaissent, la mer est calmée presque immédiatement; ce savant navigateur explique comment les montagnes de glace peuvent se produire, en admettant que, lorsque la glace a acquis près de 1 mètre, les neiges qui tombent sur sa surface se fondent, puis gèlent ensuite; ce phénomène répété peut augmenter considérablement leur masse.

On trouve aussi, dans ces parages, des *montagnes de glace*, qui n'ont pas la même étendue, mais qui sont beaucoup plus épaisses et atteignent des hauteurs considérables. Elles sont souvent situées sur terre, à l'ex-

trémité de vallées qui viennent s'ouvrir dans la mer et forment les extrémités des glaciers polaires. Ces glaciers déversent donc dans la mer ces blocs de glace qui ont quelquefois des dimensions énormes. On en voit qui sont recouverts de quartiers de rochers, d'arbres déracinés, et quelquefois de petits lacs d'eau douce, formés dans leurs cavités. Il faut rapporter à des causes analogues ces blocs erratiques, ou *moraines*, qui sont transportés par ces débris de glaciers polaires à des distances considérables de leur gisement primitif. Ainsi, aux îles Shetland du Sud viennent échouer des glaces provenant du pôle sud, et qui transportent des masses de granit et de gneiss.

Ces montagnes de glace sont, en général, très-fragiles, et se brisent dans toutes leurs parties par des chocs qui ne sont pas très-violents.

On a avancé que les glaces du pôle nord s'étendent davantage qu'autrefois, et on cite, à cet égard, les côtes du vieux Groënland, qui étaient habitées, et qui sont maintenant inaccessibles et couvertes d'énormes glaçons; mais on ignore si cette marche sera toujours croissante, et s'il n'y a pas là un grand phénomène d'oscillation à longue période, analogue à celui qui a lieu annuellement dans les glaciers qui avancent ou reculent suivant la température des saisons.

A une certaine époque, qui a lieu en juin et juillet pour l'hémisphère nord, et en février et en mars pour l'hémisphère sud, les masses de glace qui s'étaient formées vers les pôles se rompent et s'avancent vers les régions plus chaudes, en vertu des courants d'eau, dont il sera ultérieurement question. Ces blocs de glace arrivent quelquefois vers le 40ᵉ degré de latitude, et lorsque des masses semblables se rencontrent, il en résulte des chocs épouvantables : en général, les masses une fois détachées des pôles ont une tendance à venir dans des latitudes peu élevées.

Malgré ces mouvements continuels, il y a de temps en temps de grandes débâcles polaires : ainsi, en 1818 (*Annales de phys. et de chim.*, t. VIII, p. 328), on a

rencontré de grandes masses de glace entre 40° et 41° de latitude nord. On a même assuré que plusieurs de ces masses de glace avaient gagné les mers tropicales. En approchant des pôles, on en a vu marcher en sens inverse : les unes poussées par des courants supérieurs, les autres par des courants inférieurs. En 1829, il y eut une débâcle du pôle sud qui apporta, près du cap de Bonne-Espérance, d'immenses masses de glace.

§ V. — *Composition de l'eau de mer; salure de l'Océan.*

L'eau de mer, qui est colorée de diverses manières en grande masse, a une saveur salée, âcre et saumâtre, due à des sels de diverse nature qu'elle tient en dissolution, et à la présence de matières organiques; elle renferme en outre des gaz, sur lesquels nous reviendrons en traitant de l'atmosphère.

Les sels sont ordinairement le chlorure de sodium, le chlorure de magnésium, qui donne à l'eau de l'amertume, des sulfates de soude et de magnésie, et une petite quantité de carbonates de chaux et de magnésie.

Voici les densités des eaux de plusieurs mers, déterminées par M. le docteur Marcet (*Annales de physique et de chimie*, t. XII, p. 295, année 1819):

	Densité.		Densité.
Océan Arctique (de 66° à 80° de lat.)	1,02664	Mer de Marmara (moy.)	1,01910
Hémisphère nord (de 3° à 63°).	1,02829	— Noire	1,01400
Équateur.	1,02777	— Blanche.	1,01900
Hémisphère sud (de 8° à 65°) . .	1,02920	Baltique (dans le Sund). . .	1,01600
Mer Jaune.	1,02291	Baie de Baffin.	1,00015
Mer Méditerranée.	1,02930	Lac Ourmia.	1,16507

Le tableau suivant renferme les analyses de quelques eaux de mer.

SELS SUR 1000 GRAMMES D'EAU.	BERGMANN. Atlantique.	B. LAGRANGE ET VOGEL. Manche et Atlant.	Méditerranée.
Chlorure de sodium....	gr. 32,155	gr. 26,646	gr. 26,646
» de magnésium.	8,771	5,853	7,203
Sulfate de magnésie....	»	6,465	6,991
» de chaux......	1	0,150	0,150
Carbonates de chaux et de magnésie, etc....	»	0,200	0,150

L'analyse de Bergmann a donné une teneur trop forte en chlorure de sodium.

Nous donnerons encore une autre analyse du docteur Marcet, faite sur l'eau de mer recueillie au milieu de l'océan Atlantique du nord, loin, par conséquent, de l'embouchure des fleuves qui déversent continuellement de l'eau douce dans la mer.

	Eau, 1 kilogr.	Sels desséchés.
Chlorure de sodium ..	26,600......	26,60
— de magnésium ..	5,134......	9,91
— de calcium.....	1,232......	1,95
Sulfate de soude.......	4,660......	4,66

M. Marcet y a reconnu encore l'existence du sel ammoniac, des iodures et des bromures de sodium et de magnésium probablement, et d'une matière organique. Il existe peut-être encore d'autres sels, mais en si petite quantité qu'ils sont inappréciables.

L'eau de la mer Morte renferme une plus grande quantité de matières salines que celle de l'Océan, dans la proportion de 25 de sels pour 100 d'eau, tandis que cette proportion n'est que de 3 pour 100 environ dans l'eau de mer ordinaire. Cette eau, dont la densité est

1,2122, a pour composition, d'après Gmelin (*Annales de physique et de chimie*, t. XXXV, p. 102):

Chlorure de calcium.	3,214
— magnésium	11,773
Bromure de magnésium	0,489
Chlorure de sodium	7,078
— potassium	1,674
— aluminium	0,090
— manganèse	0,022
Sel ammoniac	0,008
Sulfate de chaux	0,053
	24,401
Eau	75,599
	100,000

On est assez porté à considérer cette grande masse d'eau, en raison de la quantité de sel qui s'y trouve, comme une mer qui se dessèche.

La salure des mers n'est pas la même dans toutes les contrées. Le capitaine Kotzebue a observé que l'océan Atlantique est plus salé que l'océan Pacifique, et que, dans chacun de ces océans, il existe un *maximum* septentrional et austral de salure. Le premier est plus éloigné de l'équateur que le second; le *minimum* se trouve dans l'Atlantique à quelques degrés de la ligne; M. Lenz a été plus précis; il a dit que les maxima étaient, en mer calme, par 22° de latitude nord, et par 18° de latitude sud; tandis que le minimum existait à quelques degrés au sud de l'équateur. Dans l'océan Atlantique, comme dans l'océan Pacifique, la salure est plus forte du côté de l'occident que du côté de l'orient. (*Voyez* aussi un travail de M. Gay-Lussac, *Annales de physique et de chimie*, t. VI, p. 426.)

M. Marcet avait déjà conclu, de ses observations :

1° Que l'océan méridional contient plus de sel que l'océan septentrional, dans le rapport de 1,02920 à 1,02757;

2° Que la pesanteur spécifique moyenne de l'eau de mer, près de l'équateur, est égale à 1,02777, ce qui forme un intermédiaire entre celles de l'eau de mer dans les hémisphères nord et sud;

3° Qu'il n'y a pas de différence sensible dans la salure de l'eau de mer sous différents méridiens;

4° Qu'aucune preuve suffisante n'établit que la mer soit plus salée à une certaine profondeur qu'à la surface;

5° Que la mer, en général, contient plus de sel là où elle est la plus profonde et la plus éloignée des continents, et que sa salure diminue toujours dans le voisinage des grandes masses de glaces;

6° Que les petites mers intérieures, quoique communiquant avec l'Océan, sont beaucoup moins salées que lui;

7° Que cependant la Méditerranée contient plutôt une plus grande proportion de sel que l'Océan.

D'un autre côté, M. de Humboldt établit comme il suit les proportions de sel contenues dans les eaux de mer :

Entre l'équateur et 14° de latitude......0,0374
Entre 15° et 25° de latitude...........0,0394
Entre 30° et 44° *id.*..................0,0386
Entre 50° et 60° *id.*..................0,0372

Ces proportions montrent que la salure diminue en approchant des régions polaires, fait que M. Marcet avait énoncé dans la 5e catégorie de ses conséquences. Elle doit également varier, particulièrement à la surface, avec la proximité des glaces permanentes, et l'importance ou le nombre des rivières qui débouchent dans la portion de mer que l'on considère. On attribue à cette cause la moindre salure, comparée à celle de l'Océan, de la mer Blanche, de la mer Noire, de la mer Caspienne et de la mer Jaune.

On avait annoncé que la salure de la mer augmentait avec la profondeur; mais, d'après les discussions auxquelles on s'est livré à cet égard, il résulte que les observations ne sont pas assez nombreuses pour établir ce fait.

En résumé, l'eau de mer, contenant en moyenne 3 pour 100 de matières salines, si on évalue la quantité totale de sel que contiennent les eaux de l'Océan, on trouve que ces sels représentent une couche qui, répandue sur tout le globe, ne dépasserait pas 15 mètres d'épaisseur, la masse totale des eaux de l'Océan étant représentée par une couche de 1000 mètres et la densité du chlorure de sodium étant un peu plus grande que 2.

On n'est pas bien d'accord sur la cause de la salure de la mer; les opinions varient à cet égard. Quelques personnes pensent que les eaux de la mer ne renferment plus que les résidus des substances tenues jadis en dissolution, substances qui ont été successivement déposées. On a également avancé que les fleuves, dont les eaux ne sont jamais pures, apportent sans cesse à l'Océan des eaux contenant une petite quantité de sels, qui doivent augmenter continuellement sa salure, attendu que l'évaporation n'enlève aux mers que de l'eau douce. Pour savoir jusqu'à quel point cette opinion peut être soutenue, calculons approximativement quelle est la quantité des matières salines qui peut ainsi être apportée à l'Océan. Admettons qu'il tombe dans chaque lieu du globe 1 mètre d'eau à l'état de pluie, et que 1/3 seulement retourne à la mer par les rivières et les fleuves; il en résulte que la quantité d'eau qui arriverait à l'Océan par les rivières de tous les pays, équivaudrait à une couche couvrant les continents et qui aurait $0^{m},33$ d'épaisseur, ou bien à une couche qui, répandue sur toute la terre, aurait $\frac{0,33}{4}$ c'est-à-dire $0^{m},083$, puisque les eaux couvrent les $\frac{3}{4}$ du globe. Or, en supposant qu'en moyenne les eaux contiennent $\frac{1}{5000}$ de sel en dissolution et que ces sels aient une densité de 2,1, la quantité de sel enlevé aux continents, et qui reviendrait annuellement à la mer, formerait une couche couvrant le globe et ayant une épaisseur de $\frac{83^{mm.}}{5000.2,1} = 0^{mm.},008$; ce serait $0^{mm.},8$ par siècle. Comme la quantité totale de matières salines contenue dans la mer peut être représentée par une couche de sel de 15 mètres d'épaisseur,

la salure de l'Océan augmenterait de $\frac{0,8}{15000}$ par siècle; ce serait près de $\frac{1}{100}$ en dix mille ans ou de $\frac{1}{10}$ en cent mille ans.

Il existe une cause de salure de l'Océan qui a dû exercer une influence d'une manière plus énergique lors des temps anciens que maintenant : ce sont les nombreuses sources minérales qui surgissent même quelquefois au milieu des eaux, comme on en a des exemples. Pour donner une idée de la quantité de matières qui peut être ainsi apportée à l'Océan à l'époque actuelle, nous citerons le jaugeage fait en 1831 par M. Boussingault, sur une source minérale de l'Amérique. Le volume des eaux du Pasambio ou Rio-Vinagre, originaire du volcan de Paracé, est tel qu'à cette époque la largeur du torrent avait $3^{m},66$, la profondeur moyenne $0^{m},11$, et la vitesse 1 mètre par seconde. Avec ces données on trouve, d'après la composition de l'eau, que cette source débitait par 24 heures 34784,64 mètres cubes d'eau, entraînant 38611 kil. d'acide sulfurique et 31654 kil. d'acide chlorhydique.

§ VI. — *Couleur de la mer.*

L'eau, vue en petite quantité, paraît incolore; mais il n'en est pas de même considérée en masse : elle est alors colorée, tantôt en vert, tantôt en bleu, comme celle de certains lacs de la Suisse; tantôt elle a un aspect sombre, jaunâtre ou rougeâtre. Ces différentes teintes ont fait donner aux mers méditerranées les noms de mer Rouge, mer Jaune, mer Noire, mer Blanche. Mais d'où provient la teinte de ces eaux? Il est impossible, dans l'état actuel de la science, de répondre complétement à cette question, qui se rattache aux parties les plus délicates de l'optique; nous ferons connaître cependant les opinions des physiciens à ce sujet.

Il est probable que l'eau se trouve dans les conditions des corps qui se présentent à nous sous deux teintes différentes. L'une de ces teintes est due à ce que l'on voit ce corps par l'intermédiaire des rayons réfléchis à la surface

de ses molécules ; l'autre, à ce que les rayons lumineux qui nous le font apparaître ont traversé une certaine épaisseur de sa masse. Dans le premier cas, il est vu par réflexion ou par diffusion ; dans le second, par réfraction ou par transmission. Dans ces deux circonstances, les rayons, n'ayant pas subi la même modification, n'affectent pas de la même manière notre rétine, quand ils viennent la frapper.

On est porté à croire que la teinte provenant de la lumière dispersée, ou irrégulièrement réfléchie par les molécules d'eau, est bleue, et que la teinte des rayons transmis est verdâtre ou jaunâtre. En partant de ces principes, on se rend compte des modifications que peut subir l'une ou l'autre de ces couleurs, en vertu de causes que nous allons indiquer. La mer, par diffusion, nous présente d'abord la teinte bleue qui lui est propre ; celle-ci est ensuite modifiée par la couleur des matières en suspension ; enfin la teinte résultant de ce mélange se complique de celle qui provient du fond de la mer, lorsque la profondeur n'est pas considérable, laquelle dépend de la couleur et du pouvoir émissif des substances qui le composent. Cette dernière couleur, lorsque l'on analyse les effets produits, ne doit pas être prise comme celle qu'affecteraient les substances retirées du fond de la mer et séchées en plein air ; car, dans l'eau, la lumière qui parvient à une certaine profondeur est jaunâtre ou verdâtre, et les objets qui, de ces profondeurs, nous envoient des rayons lumineux ne sont éclairés qu'à l'aide de la lumière colorée par son passage à travers les couches d'eau qui les recouvrent.

Il résulte de là que la couleur bleue est celle sous laquelle se présentent à nous les masses d'eau assez pures et profondes ; c'est effectivement en général la teinte des mers au large, et celle de quelques lacs de la Suisse qui ne laissent aucun résidu coloré lors de leur évaporation (1).

(1) On peut, dans les cours, donner l'exemple d'un liquide qui montre d'une manière bien tranchée les deux teintes que peuvent

Si la mer est peu profonde et qu'au fond se trouve du sable jaunâtre ou verdâtre, une teinte de jaune et de vert, provenant de la manière dont ces sables sont éclairés, est renvoyée à l'observateur et se mélange au bleu de l'eau, de sorte que la masse de l'Océan paraît verdâtre (1). C'est là peut-être, comme le pense M. Arago (*Annuaire de* 1839, page 436), le secret des nuances qui indiquent au navigateur la présence des bas-fonds. Si le fond de mer est rougeâtre, comme dans la baie de Loango, la teinte peut tourner au rouge. Enfin, lorsque la mer tient en suspension des matières organiques verdâtres, ou bien des matières terreuses jaunâtres ou rougeâtres, principalement près des côtes, la teinte bleue de l'océan, et l'on peut dire celle de l'eau en général, se complique de ces dernières et peut être entièrement masquée.

Il faut rapporter à cette cause les bandes d'eau verte si étendues que l'on rencontre dans les mers polaires, et qui, d'après Scoresby, ne doivent leur couleur qu'à des myriades de méduses dont la teinte est jaunâtre. Ces couleurs sont quelquefois si tranchées, que l'on passe du vert au bleu, comme cela arrive près des embouchures des fleuves, lorsqu'on distingue à une grande distance les eaux qui ne sont pas mélangées.

Enfin, les vagues d'une mer qui paraît bleue, lorsqu'elle est calme, peuvent présenter des teintes verdâ-

---

affecter les corps; il suffit de faire dissoudre dans quelques litres d'eau distillée un peu de sulfate de quinine à l'aide de plusieurs gouttes d'acide sulfurique, pour avoir un liquide dont la surface, vue sous une grande incidence, paraît bleue par réflexion.

(1) Il est intéressant, à propos de ce sujet, de rappeler quelle est l'absorption éprouvée par la lumière dans son passage à travers l'eau. Bouguer a trouvé que 10 pieds d'eau de mer transparente et assez pure n'absorbent pas au plus 0,4 de la lumière incidente. Il résulte de là qu'après un trajet de 10 mètres, un faisceau d'une intensité 1 n'aurait plus qu'une intensité 0,216; après 20^m, 0,047; après 30^m, 0,01; après 40^m, 0,002; et après 50^m, 0,0005 ou $\frac{1}{2}$ millième de l'intensité de la lumière incidente. Lorsque l'eau est trouble, l'absorption de la lumière est beaucoup plus rapide.

tres quand il arrive de la lumière transmise par les tranches de ces vagues, car, d'après ce que nous avons dit, la teinte des rayons transmis par l'océan tourne au verdâtre ou au jaunâtre.

En Amérique, suivant M. de Humboldt, on observe des différences très-marquées dans les couleurs des rivières; le Zama, le Mataveni, l'Atabapo, le Tuamini, etc., paraissent bruns en grandes masses, et d'un beau vert-pré quand le vent agite leur surface. (Humboldt, *Voyage aux régions équinoxiales*, t. VII, p. 229.)

Ces eaux sont très-transparentes et très-limpides, et leur fond est formé d'un sable quartzeux très-blanc. M. de Humboldt attribue leur couleur noirâtre à la présence de carbures d'hydrogène; en tout cas, ce sont des matières étrangères tenues en dissolution qui produisent ces effets.

On a prétendu que la teinte du bleu céleste atmosphérique se mêlait à celle de l'eau, et pouvait aider à lui donner cette nuance. Pour s'en assurer, il suffirait de regarder l'eau sous une certaine inclinaison; la lumière atmosphérique, arrivant alors réfléchie vers l'observateur, est polarisée, et, d'après M. Arago, on pourrait l'éliminer à l'aide de prismes de Nichol ou de tourmaline. On verrait si la teinte de l'eau reste encore d'un beau bleu dans les endroits où elle est très-pure.

En résumé, les teintes si diverses des eaux proviennent probablement d'actions physiques particulières qu'éprouvent les rayons lumineux dans leur réflexion et leur transmission, modifiées par la présence des particules étrangères mélangées avec elles et par des circonstances accidentelles.

§ VII. — *Phosphorescence de la mer.*

La phosphorescence de la mer a été observée depuis un temps immémorial. Le phénomène est tellement marqué dans certaines localités, que les personnes qui prennent le moins d'intérêt aux phénomènes naturels

ont dû être frappées de l'effet magique qu'il produit quelquefois.

Dans la plupart des régions de l'Océan, en général dans le voisinage des côtes, des îles ou des récifs, et particulièrement sous la zone tropicale et dans la mer des Indes, dès que le jour disparaît, on voit jaillir du sein des eaux une lumière phosphorique plus ou moins vive. Cette lumière se manifeste aux crêtes des vagues qui retombent sur elles-mêmes, autour du gouvernail des vaisseaux, dans les lames qu'entr'ouvre la proue, et dans les flots qui se brisent sur les rochers et les récifs. L'effet est souvent si remarquable, qu'un bâtiment poussé par le vent laisse au loin derrière lui une trace lumineuse qui s'efface insensiblement.

La phosphorescence de la mer se rattache à celle des corps organisés, et est due, soit à des animalcules qui nagent dans la mer, et qui nous présentent sur une plus petite échelle les lueurs des lampyres (vers luisants), ou des fulgores; soit à des matières organiques tenues en suspension dans les eaux, et analogues à la mucosité qui suinte des poissons de mer dans lesquels la phosphorescence est développée.

L'observation suivante de MM. Quoy et Gaimard (*Annales des sciences naturelles*, t. IV, p. 12) donne une idée de la manière dont le phénomène se produit dans beaucoup de circonstances. Étant mouillés dans la petite île de Rawak, placée sous l'équateur, ils virent un soir, sur l'eau, des lignes d'une blancheur éclatante; en les traversant avec leurs canots, ils voulurent en enlever une partie, mais ils ne trouvèrent qu'un fluide dont la lueur disparut entre leurs doigts. Peu de temps après, pendant la nuit, la mer étant calme, ils virent près du vaisseau beaucoup de zones semblables, blanches et fixes; les ayant examinées avec soin, ils reconnurent qu'elles étaient produites par des zoophytes d'une petitesse extrême, renfermant en eux un principe de phosphorescence, et qui, en nageant en zigzag, laissaient sur la mer les traînées lumineuses dont nous venons de

parler. Ils mirent le fait hors de doute, en plaçant dans un bocal rempli d'eau deux de ces animalcules, qui rendirent immédiatement toute l'eau lumineuse. Ils ont constaté, en outre, que la chaleur est une des causes déterminantes de leur faculté lumineuse.

Les observations que l'un de nous (M. Becquerel) a faites en commun avec M. Breschet, dans les eaux de la Brenta, confirment celles de MM. Quoy et Gaimard, et montrent que la phosphorescence de la mer peut être due à une matière organique intimement combinée ou mélangée avec elle. Les eaux de cette rivière, à quelques milles de Venise, jouissent de la propriété, dans les grandes chaleurs, quand elles sont ébranlées par le plus léger choc, de devenir lumineuses. Le corps le plus léger que l'on jette dans l'eau suffit pour faire naître la lumière, non-seulement dans le point frappé, mais encore dans toutes les ondes provenant de l'ébranlement du liquide. Il en résulte que, dans l'obscurité, on peut suivre très-loin toutes les ondes liquides. Cette faculté lumineuse diminue à mesure que l'on approche du bras de mer qui sépare Venise de l'embouchure de la Brenta, et il arrive un point où elle n'est plus sensible.

A l'appui de ce fait que les matières organiques sont quelquefois dans un certain état de décomposition qui précède la putréfaction, état analogue à celui dans lequel se trouvent les poissons de mer qui deviennent lumineux, nous ajouterons que, dans certaines circonstances, la vase des marais peut devenir phosphorescente. Cet état particulier dans quelques cas, et dans d'autres la présence d'animalcules lumineux, comme MM. Ehrenberg, Quoy et Gaimard l'ont observé, sont les causes de la phosphorescence de la mer.

SECTION II.

DU MOUVEMENT DES EAUX A LA SURFACE DU GLOBE.

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu

quel était le niveau de la mer dans les principaux bassins, sa température à diverses profondeurs au-dessous de la surface sous différentes latitudes, sa profondeur totale, et enfin les principales propriétés physiques des eaux de l'Océan; nous avons à examiner maintenant quels sont les mouvements qui se manifestent dans leur masse et à leur surface, et enfin les causes de ces mouvements. Nous parlerons d'abord des marées qui sont dues à l'attraction de deux des corps célestes, mouvements complétement distincts des autres; nous décrirons ensuite les courants marins qui sillonnent l'étendue de l'Océan; enfin nous examinerons l'action destructive des eaux, soit sur les rivages de la mer, soit dans nos vallées, par suite du passage des eaux pluviales dans le lit des rivières et des fleuves.

§ I. — *Des marées.*

Dans tous les ports de l'Océan, sur toutes ses côtes, en Europe, en Afrique, en Amérique, la mer s'élève et s'abaisse au-dessus et au-dessous de son niveau moyen deux fois par jour. Ce même effet se manifeste dans la mer des Indes, dans le grand océan Pacifique, dans l'océan Austral, etc. Sous le nom de flux et de reflux de la mer, il constitue un phénomène immense par son étendue, et surprenant par la brièveté de sa période d'environ douze heures. Le retour perpétuel et le retrait alternatif de cette énorme masse liquide en quelques heures sur de vastes plages, dans les larges embouchures des fleuves, dans les ports, offriront toujours un spectacle digne d'admiration. Les grandes agitations de l'atmosphère influent accidentellement sur l'abaissement ou l'élévation de quelques marées, et y peuvent exciter des perturbations; mais la grandeur du phénomène domine ces circonstances et ne se peut confondre avec elles. En parlant de la grandeur du phénomène des marées, nous faisons surtout allusion à son étendue immense, car, le plus communément, la différence de la haute mer à la basse mer ne présente qu'une éléva-

tion d'un petit nombre de mètres. Cette hauteur est très-variable d'une localité à une autre : dans la mer du Sud, la hauteur des marées n'atteint pas un mètre; sur certaines côtes, elle surpasse 20 mètres.

Des observations suivies ont fait connaître les principales lois des marées : la première de ces lois décèle une liaison intime du retour des marées de chaque port avec l'heure du passage de la lune au méridien de ce port. Ainsi on a trouvé que l'intervalle moyen de deux passages de la lune au méridien d'un même lieu est de $1^j,0351$, dont la moitié est $0^j,5175$ ou $12^h25'$: or cet intervalle de $12^h25'$ est la durée moyenne qui sépare deux pleines mers consécutives.

Ce grand phénomène physique est une des conséquences de la gravitation universelle, et provient de l'attraction de la lune et du soleil sur la masse des eaux qui recouvrent notre globe. Cette attraction, en effet, change la figure de la mer en quelques heures, comme nous l'avons vu, et donne lieu aux mouvements réguliers et périodiques du flux et du reflux.

Pour concevoir comment ces effets peuvent se produire, imaginons la terre en TM, planche I, fig. 6, et la lune en L. Si la lune n'agissait pas sur la masse liquide dont la terre est en grande partie recouverte, ce liquide serait terminé par une certaine surface m m' m'', correspondante aux attractions de toutes les molécules du sphéroïde sur chaque molécule fluide : une molécule m est alors soutenue à la surface par les pressions qu'elle reçoit de celles qui lui sont contiguës et qui balancent son poids. Mais, si à cet état de choses l'action de la lune vient s'ajouter, et que cet astre soit placé en L sur le prolongement de Tm, la forme de la surface m m' m'' sera légèrement modifiée; elle sera allongée dans les sens Tm et Tm'', et un peu déprimée dans le sens perpendiculaire Tm', car le volume total du liquide ne changera pas. Pour reconnaître la cause de l'élévation de la molécule m et de celles qui l'environnent, on doit remarquer que la lune agit sur m

avec une force plus grande que celle qu'elle exerce sur le centre T de la terre, parce que *m* est plus près de la lune que T; soit *f* la différence de ces deux forces. Cette différence a pour effet de diminuer la tendance de *m* vers T ou le poids de *m*, et des effets analogues ont lieu pour toutes les molécules liquides qui occupent la partie convexe vers la lune. La pesanteur de cette masse fluide vers la terre étant diminuée, les pressions l'emportent sur le poids et déterminent un léger soulèvement de la surface moyenne vers L. Dans la région diamétralement opposée m'' à la lune, une molécule est attirée par la lune avec une force moindre que celle exercée sur le centre de la terre; soit f'' la différence de ces deux forces; le poids de *m* vers T sera diminué pour la force f'', comme l'a été le poids de *m* pour la première force *f*, et par cette raison la surface moyenne des eaux devra être un peu soulevée par les pressions qui concouraient à maintenir la surface moyenne. Ainsi, en présence de la lune, la surface moyenne doit prendre à peu près la forme d'un ellipsoïde un peu allongé dans le sens du diamètre dirigé vers la lune. Ces deux ménisques aqueux suivent la lune dans son mouvement apparent journalier autour de la terre; ils rencontrent alternativement, l'une après l'autre, les côtes des îles et des continents, et y produisent les effets décrits précédemment.

La lune n'est pas le seul astre qui exerce une action attractive sur la mer; le soleil fait aussi sentir son influence sur les marées : il tend à élever les eaux à midi et à minuit, et à les abaisser à 6^h du matin et à 6^h du soir. Il devrait donc y avoir quatre marées par jour, deux lunaires et deux solaires, si elles existaient séparément; mais à cause de la simultanéité d'action, il en résulte une marée composée, qui, dans les syzygies, c'est-à-dire lors de la nouvelle et de la pleine lune, donne une haute mer lunaire correspondant à une haute mer solaire, l'intensité étant la somme des deux effets; dans les quadratures, lorsque le méridien de la lune est à 90° du

méridien solaire, la basse mer solaire se fait sentir en même temps que la haute mer lunaire, et la marée totale est la différence des marées produites par les deux astres.

En comparant les élévations, et par une longue suite d'observations faites dans divers ports, on a conclu que la marée lunaire est environ trois fois plus forte que la marée solaire; ainsi la petitesse de la masse de la lune est amplement compensée par sa proximité de notre globe, et la prépondérance de son action détermine les périodes principales du phénomène.

On peut, par un premier aperçu théorique, se représenter la figure de la mer comme formant deux ellipsoïdes, dont les grands axes sont dirigés vers le soleil et la lune; en raison de leur peu d'excentricité, ces ellipsoïdes permettent de calculer la hauteur de la mer par la comparaison de leurs rayons. Cependant, en réalité, comme on le verra plus loin, il y a un retard dans les marées, qui exige que l'on dirige les grands axes vers un soleil et une lune fictifs, également éloignés des astres véritables, et en retard sur ceux-ci.

Non-seulement les distances des astres font varier l'heure des marées syzygies et quadratures, mais encore la déclinaison du soleil et de la lune donne aussi lieu à des variations. L'intensité totale des marées, ou la hauteur de l'élévation des eaux, varie également avec la position des astres, leur distance et leur déclinaison. A Brest, la valeur moyenne de la marée maximum dans les syzygies des équinoxes, ou la hauteur de l'élévation de l'eau, est d'environ $5^m,5$; elle est moitié plus petite dans les quadratures.

Les retards des marées d'un jour à l'autre sont aussi influencés par la position relative des astres. Dans son état moyen, comme nous l'avons déjà dit plus haut, le retard d'un jour à l'autre est de $0^j,0351$. Il est à son minimum vers les syzygies, quand les marées sont à leur maximum, et alors il n'est que de $0^j,02723$; et à son maximum dans les quadratures, la valeur devient

alors $0^{j},05207$. Enfin, les retards des marées d'un jour à l'autre varient aussi avec la distance des astres à la terre et avec leurs déclinaisons. Mais l'examen de toutes ces circonstances nous entraînerait trop loin, hors du cadre que nous nous sommes tracé.

Plus une mer est vaste, plus les phénomènes des marées sont sensibles, car, dans une masse fluide, les impressions que reçoit chaque molécule se transmettent à la masse entière; ainsi les actions solaire et lunaire seraient insensibles sur une molécule d'eau isolée, et deviennent manifestes sur la masse entière de l'Océan. C'est pour cette raison aussi que les marées qui produisent de si grands effets dans l'Océan sont à peine sensibles dans les petites mers, telles que la mer Noire et la mer Caspienne. La grandeur des marées dépend aussi d'une multitude de circonstances locales; les côtes opposées et d'autres circonstances accessoires produisent des variétés sans nombre, qui augmentent quelquefois la hauteur des marées dans les détroits. C'est ainsi que les marées, qui sont petites dans les îles de la mer du Sud, peuvent devenir considérables dans nos ports.

Comme la plus haute marée a lieu lors des syzygies, c'est à cette époque que l'on doit trouver la plus grande hauteur de la mer; ce n'est pas ce jour-là, mais bien un jour et demi après, que l'on observe dans nos ports la marée maximum; de sorte que si la syzygie arrive au moment d'une pleine mer, c'est la troisième marée suivante qui est la plus grande. Newton, qui avait reconnu ce fait, l'avait attribué à l'inertie de la masse des eaux de l'Océan, et aux oscillations de la mer, dont les effets se faisaient sentir encore quelque temps après que les astres avaient cessé leur action. On pense que le retard d'un jour et demi de la haute mer, dans nos ports, est due à la conformation des côtes, qui, par leur résistance et le frottement, font obstacle aux mouvements des marées; ces circonstances locales ne peuvent être soumises au calcul. Laplace ne doute pas que les ondulations de l'océan Atlantique et de la mer du Sud, réflé-

chies sur la côte orientale de l'Amérique, qui s'étend presque d'un pôle à l'autre, n'aient une grande influence sur les marées que nous observons.

D'autres circonstances plus rapprochées, telles que les côtes voisines, les bassins ou les canaux qui font communiquer les ports à la mer, et à l'extrémité desquels on peut les considérer comme situés, produisent des différences entre les hauteurs et les heures des marées, dans des ports même assez voisins (1). Ces obstacles étant les mêmes dans un même port, le retard éprouvé par les marées sur l'heure du passage au méridien de la lune, est constant pour un même lieu; ainsi il est de 3^h 30′ à Brest, de 6^h à Saint-Malo, de 3^h 1/2 à Lorient, de 10^h 30′ à Dieppe; c'est là ce qu'on appelle *établissement de port*. On peut trouver cette heure en cherchant à quel moment arrive la haute mer dans une syzygie; à midi ou minuit, les deux astres étant sur le même méridien, l'heure de la pleine mer indiquera le retard. Ainsi cette heure étant de 3^h 30′ à Brest, il est 3^h 30′ quand la pleine mer a lieu dans ce port, lors des syzygies; et il est 10^h 30′ à Dieppe dans les mêmes circonstances.

La connaissance de l'établissement de port et des circonstances dont nous avons parlé plus haut, permet de calculer les heures des pleines mers et des basses mers dans tous les ports, et les marées maximum et minimum.

Indépendamment des effets de la pesanteur, la pression barométrique et les vents peuvent faire varier le niveau des mers. M. Daussy, en 1836, en comparant à Brest les observations des pleines mers, c'est-à-dire en prenant le milieu entre deux pleines mers consécutives, et la basse mer intermédiaire, a vu que le niveau moyen

(1) Les marées se transmettent quelquefois tellement loin dans les fleuves, qu'au détroit de Pauxis, dans la rivière des Amazones, à plus de 200 lieues le flux est encore sensible.

n'était pas constant, et qu'il variait suivant la pression barométrique. Il a trouvé :

Hauteur du baromètre.	Niveau moyen de la mer.
mm	
745,7	3,597
752,9	2,926
756,5	2,854
760,5	2,796
765,2	2,757

Ces résultats montrent que, lorsque la hauteur du baromètre augmente, le niveau s'abaisse.

M. Aimé, dans une serie d'observations faites dans le port d'Alger (*Annales de physique et de chimie*, 2e série, t. XII, p. 274), a reconnu que dans la Méditerranée, 1$^{mill.}$ de variation dans le baromètre correspond à 13$^{mill.}$ de variation en sens inverse dans le niveau de la mer : c'est à peu près le rapport de densité entre le mercure et l'eau de mer. Il résulte de là que la pression atmosphérique moyenne restant la même sur toute la surface de la Méditerranée, lorsqu'il y a augmentation de pression sur un point il y a diminution sur d'autres, et la surface de l'eau s'infléchit suivant le poids de l'atmosphère qui repose sur elle.

Il faut peut-être attribuer à des variations dans la pression atmosphérique *les seiches* des lacs de Suisse; on nomme ainsi des crues qui font élever l'eau dans certains endroits, sans que les circonstances extérieures aient en apparence changé.

Les vents ont aussi parfois une influence très-marquée sur les mouvements de l'Océan; près des continents, suivant leur direction, ils tendent à refouler les eaux. A Brest, à Lorient, à Rochefort, la marée, toutes choses égales d'ailleurs, ne monte jamais plus haut que par les vents d'ouest; sur les côtes des États-Unis, ce sont les vents d'est qui produisent les mêmes effets. dans la Méditerranée, la mer s'exhausse le plus dans les ports de Gênes, de Toulon et de Marseille par le vent du

sud; dans les ports d'Alger, de Bougie et de Tunis, par les vents du nord.

Enfin, de violents ouragans excitent à la surface des mers des oscillations qui ne modifient que localement et accidentellement le flux et le reflux. Mais, indépendamment de ces variations accidentelles, qui ne font pour ainsi dire que de rider la surface de l'Océan, au milieu des circonstances locales particulières et des variétés sans nombre dont il est impossible de tenir compte théoriquement, le phénomène des marées est une des manifestations les plus évidentes des effets de l'attraction universelle.

Dans ce paragraphe, nous n'avons eu pour but que de donner un aperçu des marées; nous renvoyons, pour plus amples détails, et pour les lois de ce phénomène, au Système du monde de Laplace et à l'Astronomie de Lalande.

§ II. — *Des courants marins.*

Indépendamment des mouvements des eaux occasionnés par les marées, par les différences de niveau, de salure, dont il a déjà été question, la surface des mers est sillonnée par des courants dont il importe au navigateur de connaître la direction pour les suivre ou les éviter au besoin. Quoique ces phénomènes, qui intéressent au plus haut degré la navigation et la physique terrestre, aient été un objet d'étude de la part de tous les navigateurs, néanmoins on ne connaît pas encore toutes les causes de leur production. Avant d'entrer dans quelques détails à ce sujet, il est nécessaire de connaître la direction, la position et l'étendue des différents courants qui se manifestent dans la masse de l'Océan.

On peut classer les courants en trois grandes divisions, comprenant :

1° Les courants constants.
2° Les courants périodiques.
3° Les courants variables et accidentels.

Les courants des deux dernières divisions sont moins étendus que ceux qui constituent la première; nous allons les passer successivement en revue.

Courants constants. — M. le capitaine Duperrey, en rapportant sur une carte ses observations et celles recueillies dans les voyages de Cook, de Baudin, de Flinders et d'autres navigateurs, est parvenu à trouver la direction des grands courants qui circulent à la surface des mers, et à rattacher ensemble tous les courants partiels. Nous allons essayer d'indiquer, d'après lui, quelle est la distribution de ces courants, qui jouent un grand rôle sur le transport de tous les corps organisés d'une contrée dans une autre : nous en donnons, pl. V, le dessin, qui n'est encore qu'un projet de la carte générale des courants marins, que l'habile navigateur doit publier.

A l'inspection de cette carte, on voit que le pôle austral est le point de départ de trois courants d'eau froide. Le premier, celui qui est au centre, se dirige vers l'est, et va frapper la côte occidentale de l'Amérique du Sud, où il se divise en deux branches vers le 40e degré de latitude australe; la branche sud côtoie la Patagonie, tourne le cap Horn et échauffe toutes ces côtes, parce qu'il vient de basses latitudes et se rend dans des régions plus froides; la branche nord, qui est la plus étendue, au contraire, côtoie le Pérou et le Chili, et adoucit le climat de ces contrées voisines de l'équateur, qui diffère, comme on sait, considérablement de celui du Brésil. Ce courant nord, après avoir côtoyé le Pérou, se replie sur lui-même pour suivre le grand Océan dans une direction de l'est à l'ouest, et forme ce qu'on appelait jadis le grand courant équinoxial. La Nouvelle-Zélande se trouve placée au milieu de la partie de la mer qui n'est pas atteinte par le courant principal et la branche qui a suivi la ligne équinoxiale.

Au courant équatorial de l'hémisphère sud s'en joint un autre dans la même direction, venant de l'hémisphère nord, et qui en est séparé par une bande océanique de 7° environ de largeur, laquelle est placée le

plus souvent au nord de la ligne, et où règne une sorte de remous dirigé en sens contraire des courants.

Ces deux courants s'échauffent en approchant des Carolines, et leur marche est sans cesse contrariée par toutes les îles. Aux approches du grand archipel d'Asie, ce grand courant se divise en deux branches.

L'une se dirige vers le nord, l'autre vers le sud. La première branche se dirige d'abord vers le nord, le nord-est, vient passer entre les îles Mariannes et les îles du Japon, puis vient côtoyer les îles Aleutiennes sans atteindre le Kamtschatka; avant d'y arriver, il tourne vers l'est, puis vers le sud, et retombe dans le grand courant équinoxial, à la hauteur de la pointe de la Californie.

La seconde branche se dirige vers la côte orientale, la Nouvelle-Hollande, contourne la Nouvelle-Zélande, rejoint le courant austral central, qu'elle vient réchauffer dans la partie occidentale; elle s'étend au delà de la terre de Van-Diemen, et vient se confondre avec une branche du second courant polaire austral, prenant naissance dans les méridiens des Indes et se dirigeant à l'est, comme tous les courants d'eau froide.

Ce deuxième courant d'eau froide, situé à l'occident du courant central, vient heurter la côte occidentale de la Nouvelle-Hollande; il se dirige ensuite au nord vers les îles Java et Sumatra, où il rejoint la partie du grand courant équinoxial qui n'a pas été arrêtée dans l'Archipel par tous les obstacles qu'il a rencontrés dans sa marche. Ce courant se dirige vers l'ouest, prend sa route vers le sud, entre l'Afrique et Madagascar, contourne le cap de Bonne-Espérance, où il est considéré comme courant d'eau chaude.

Ce courant vient se réunir lui-même avec le troisième courant austral, qui est entraîné le long de la côte occidentale de l'Afrique. Il sert à alimenter le courant équinoxial de l'Atlantique, et forme le Gulf-Stream, dont on doit une très-bonne description à M. de Humboldt. Ce courant entre dans le golfe du Mexique, s'y réfléchit,

débouche par le détroit de Bahama, se meut du sud-ouest au nord-est à une certaine distance de la côte des États-Unis, en conservant une portion plus ou moins considérable de la température qu'il avait entre les tropiques. Il se bifurque en deux : une des branches va adoucir le climat de l'Irlande, des Orcades, des îles Shetland et de la Norwége; l'autre partie s'infléchit graduellement, et finit, en revenant sur ses pas, par traverser l'Atlantique du nord au sud, et quelquefois à une distance assez peu considérable des côtes d'Espagne et de Portugal. Après un long circuit, les eaux viennent rejoindre le courant équinoxial d'où elles étaient sorties.

Ce grand courant équinoxial de l'Atlantique, comme nous l'avons déjà dit, s'étend de chaque côté de la ligne, sur une grande étendue, qui varie suivant la situation apparente du soleil. On lui assigne les limites du 16e au 30e degré de latitude; il commence à se faire sentir au sud-ouest des Açores. Il est très-faible du 15e au 25e degré de latitude. Vers la ligne, sa direction est moins constante que vers le 10e ou le 15e degré, et se dirige vers la baie de Honduras, traverse le golfe du Mexique, et se jette avec impétuosité dans le détroit de Bahama avec une vitesse de 2^m par seconde, malgré les vents du nord qui règnent constamment dans cette région; puis il suit la direction indiquée plus haut.

Sous le 33° de latitude, un voyageur peut passer, dans le même jour, suivant M. de Humboldt, du courant oriental dans le courant occidental. A la hauteur du cap Blanc, ce courant, après avoir longé la côte d'Afrique, se dirige d'abord vers le sud-ouest, et se réunit au grand courant équatorial appelé Gulf-Stream. Les deux courants sont séparés par une zone de 140 lieues de large. On estime que les eaux de ce grand courant, d'après les vitesses observées, parcourent un circuit de 3800 lieues dans l'espace de trois ans, savoir : 13 mois pour aller des îles Canaries aux côtes de Caracas; 10 pour faire le tour du golfe du Mexique; 2 pour arriver près du banc de Terre-Neuve, et 10 à 11 pour revenir sur

18

les côtes d'Afrique. C'est du 45 au 50e degré de latitude que le Gulf-Stream dirige une branche vers le nord-est sur les côtes de l'Europe. Il n'est pas sans intérêt de donner les températures de cet immense courant qui joue un si grand rôle dans la navigation. Entre les 40e et 41e degrés de latitude, sa température est de 18°; en dehors du courant, elle n'est que de 14°; sous le parallèle de Charleston elle est de 20°, et les eaux en dehors de 14°. Il n'a plus que 7 ou 8° près du banc de Terre-Neuve.

Voici, d'après M. le capitaine Duperrey, les effets produits par le grand courant austral central, dont il a suivi le cours sur toute la surface des mers avec une grande sagacité. Prenons ce courant quand il vient heurter la côte du Chili, où une des portions remonte vers l'équateur et l'autre descend vers le cap Horn. Celui qui se dirige vers le sud paraît avoir découpé profondément les côtes occidentales de la Patagonie, donné naissance aux îles qui la bordent, et séparé du continent la Terre de Feu. Ce courant rend très-difficile le passage du cap Horn; pour le franchir, il faut prendre le large. La portion qui a remonté vers le nord paraît avoir creusé le grand enfoncement sur les côtes occidentales de l'Amérique, entre le 25° et le 15° de latitude. Ce courant a donc contribué à donner aux côtes occidentales de l'Amérique leur configuration actuelle. Le courant qui exerce une si grande influence sur les côtes de l'Amérique méridionale se lie intimement avec la direction générale des vents, et par suite avec la marche du soleil. Effectivement, on a observé que le courant s'élève vers le nord lorsque cet astre est dans notre hémisphère, tandis que le courant descend de l'autre côté de la ligne lorsque le soleil est dans l'hémisphère austral.

Les mesures de température des eaux de ce courant, avant qu'il ait atteint les côtes de l'Amérique, ne laissent aucun doute à cet égard. En effet, entre le 105e et le 90e degré de longitude, au mois de janvier, le thermomètre marque 4° au-dessus de 0, tandis qu'après avoir

touché la côte, la branche qui se dirige sur le cap Horn a une température de 9° dans les parages mêmes du cap. Cet effet ne peut pas être attribué à la chaleur continentale en raison de sa basse température, mais bien à ce que depuis le point de départ de cette portion de courant, la température de la mer est supérieure à celle de l'air; sur les côtes du Pérou, le contraire a lieu. Ainsi la branche principale du courant, partie du pôle austral, s'échauffe en s'approchant de 30° de latitude, à tel point qu'il prend une température supérieure à celle du Chili, dont il améliore le climat, tandis que la partie qui se dirige vers le nord, étant inférieure à celle du Pérou, va nécessairement abaisser celle-ci. Cette influence de la température du courant sur celle des côtes a permis d'expliquer certains faits qui n'avaient pu l'être jusqu'ici. Au Pérou, où la température est très-adoucie par l'action du courant, les habitants ont pu cultiver eux-mêmes les terres sans le secours des esclaves, et par conséquent les colonies espagnoles ont pu s'y conserver intactes. Il n'en est pas ainsi au Brésil, sous les mêmes parallèles, où les chaleurs excessives ont obligé les Portugais à avoir recours aux esclaves africains pour la culture du sol. On explique par la même raison comment la végétation présente les mêmes caractères au Chili qu'à la Terre de Feu, et pourquoi les colibris se trouvent depuis le Chili jusqu'au cap Horn.

D'après la direction des courants de l'est à l'ouest dans le grand Océan, on voit que les naturels des îles de la mer du Sud n'ont jamais abordé en Amérique avec leurs pirogues.

Le major Rennel pense que l'immense amas de fucus qui couvre la mer à l'ouest des Açores, sur une très-grande étendue, que l'on compare à celle de la France et qu'on appelle mer herbeuse, mer de Varec, en raison des herbes (*fucus natans*) qui la couvrent, est apporté par le Gulf-Stream du golfe du Mexique. Cependant les opinions des navigateurs à ce sujet ne sont pas les mêmes, et quelques-uns pensent que ces fucus pourraient

croître sur les récifs qui seraient au fond de l'Océan dans ces parages, ou bien végéter à la surface même des eaux. Du reste, d'après les observations de M. de Humboldt et du major Rennel, cette mer, qui avait été aperçue par Christophe Colomb, ne change de place ni en longitude ni en latitude.

Les courants du pôle nord offrent également des effets très-remarquables. Ce sont eux qui amènent sur les côtes d'Islande une énorme quantité de glaces qui en remplissent les golfes septentrionaux. Quelquefois, au lieu de glace, ils y transportent des amas immenses de bois flottants. Ces arbres, suivant toutes les apparences, arrivent de la Sibérie et de l'Amérique septentrionale. On y a même reconnu des espèces qui ne croissent qu'au Mexique et au Brésil. En général, ce sont des troncs de pins, de sapins, de quelques arbres résineux et d'acajou. Ces derniers sont toujours percés par des tarets, mollusques testacés.

M. le capitaine Duperrey a fait une étude spéciale, dans sa navigation sur *la Coquille*, du courant d'eau chaude qui passe entre la Nouvelle-Hollande et la Nouvelle-Zélande pour aller rejoindre le courant central austral. Nous donnons ici quelques-unes des observations thermométriques qu'il a faites, l'une à l'est, l'autre à l'ouest de la Nouvelle-Hollande.

DÉCEMBRE 1823.

Latitudes. S.	Longitudes. E.	Temp. air.	Temp. mer.
33°28′	101°59′	16°,5	17°,1
33 51	150 23	20 ,9	22 ,0
36 10	104 21	14 ,4	14 ,8
37 51	107 12	14 ,4	14 ,8
37 19	153 13	19 ,8	19 ,6
39 59	109 30	13 ,2	12 ,7
42 38	116 33	12 ,1	11 ,1
43 43	124 27	10 ,7	10 ,7
43 40	151 30	14 ,7	14 ,6
46 44	146 58	15 ,0	12 ,7

On remarque que les observations du côté de l'est

donnent des nombres plus forts que celles du côté ouest.

La présence du courant est indiquée par la différence de plus de 4° de température que l'on observe en passant de 43°,40 à 43. A la latitude de 46°,44, le courant avait une vitesse de 21 milles vers le sud et de 42 milles vers l'est.

Voici d'autres déterminations thermométriques de M. le capitaine Duperrey, relatives au courant d'eau chaude qui passe entre le Japon et les îles Mariannes. Chacune des températures est la moyenne de toutes les observations faites, de deux heures en deux heures, dans les 24 heures.

Dates. 1819	Latitude. N.	Longitude. E.	Temp. air.	Temp. mer.
24 juin...	24°00′	153°30′	27°,1 ...	27°,4
3 août..	23 44′	205 41	22,8 ...	23,2
1er juillet.	26 16	156 47	27,0 ...	25,7
2 août..	26 1	204 56	22,0 ...	22,5
4 juillet.	30 29	160 13	24,7 ...	26,7
31 juillet.	30 29	203 36	22,1 ...	22,2
6 juillet.	32 59	160 38	24,7 ...	24,7
30 juillet.	32 55	203 8	22,1 ...	22,2
10 juillet.	36 44	163 36	22,3 ...	21,8
28 juillet.	36 43	201 33	22,5 ...	22,4
19 juillet.	51 12	184 56	18,6 ...	17,4
20 juillet.	41 2	188 40	19,4 ...	16,6

Nous citerons quelques courants partiels pour compléter le tableau que nous avons tracé des courants qui sillonnent les mers. On trouve dans la Gascogne un courant se dirigeant vers le nord-est, qui, probablement, n'est qu'une portion du Gulf-Stream. Dans la Méditerranée, il en existe un autre qui suit les côtes septentrionales de l'Afrique. Ce courant remonte vers le nord-est sur les côtes de Syrie, semble s'arrêter à l'île de Candie, pour revenir sur la Sicile, et de là sur les côtes d'Espagne. Ce courant est-il une fraction du Gulf-Stream, ou bien ne dépend-il pas plutôt de l'inégale évaporation des eaux de la Méditerranée et de l'Océan? Cette seconde hypothèse est la plus probable. On observe égale-

ment des courants dans le détroit de Constantinople, dans celui des Dardanelles, et dans celui de l'archipel grec, qui se dirigent vers la Méditerranée.

2° *Courants périodiques.* — Le courant équinoxial, avons-nous dit plus haut, est modifié par les moussons en approchant du grand archipel d'Asie : c'est une preuve de l'influence du déplacement des masses d'air sur les courants marins. On a un très-grand nombre d'exemples de courants périodiques le long des côtes, surtout dans les mers de l'Inde et de la Chine, lorsque le soleil a ses déclinaisons australes ou boréales (1). Ainsi, dans le golfe de Manar, entre Ceylan et le cap Comorin, il y a un courant dirigé vers le nord, depuis le mois de mai jusqu'au mois d'octobre ; il passe au S.-O. ou S.-S.-O. pendant les autres mois; sa vitesse ordinaire à la côte est d'une lieue par heure (1m, 1 par seconde). Le long de la côte de Ceylan, de la pointe Pedro au nord de l'île, à la pointe de Galle au sud, règnent des courants qui portent au sud, au S.-E., etc., suivant la direction de la côte, et qui n'ont que peu de force en juin et novembre. Dans la baie du Bengale, les moussons, dont nous parlerons dans le chapitre suivant, donnent naissance à des courants marins pendant leur durée.

Dans les mers de la Chine, les courants se dirigent assez généralement vers le N.-E., du 15 mai au 15 août, et ont une direction contraire d'octobre en mars ou avril. La vitesse est en général plus grande pendant octobre, novembre et décembre, que celle des courants contraires en mai, juin et juillet. Le plus fort courant de ces mers est celui qui est près des côtes de Cambodje, et qui marche vers le sud à la fin de novembre, avec une vitesse d'un mètre à un mètre et demi par seconde.

Des courants se font sentir dans d'autres régions, près des côtes, en Afrique et en Amérique. On pourrait multiplier les exemples des courants périodiques observés, et qui montrent l'influence des saisons sur leur di-

(1) Voyez Manuel de M. Labèche.

rection; mais ils n'ont pas une étendue aussi grande que les grands courants généraux dont nous avons parlé.

On observe des courants périodiques qui peuvent en partie avoir pour cause l'évaporation inégale des eaux, jointe aux vents régnants. C'est ainsi qu'il existe un courant de l'Océan dans la mer Rouge, depuis octobre jusqu'en mai, et un courant en sens contraire pendant le reste de l'année. Les eaux du golfe Persique présentent un effet inverse : d'octobre en mai, un courant marin va du golfe dans l'Océan, et de mai en octobre, de l'Océan dans le golfe.

3° *Courants variables et accidentels.* — Ces courants ne sont soumis à aucune loi régulière; ils sont produits, soit par l'influence des vents variables qui règnent le long d'une côte pendant plusieurs jours, soit par des tempêtes, des trombes, etc.

Nous signalerons encore des mouvements qui sont indépendants des vents et des marées, et qui produisent quelquefois de petits courants à la surface de la mer; voici comment M. de Humboldt les a décrits dans sa traversée en Amérique (1) :

« Lorsque la mer est parfaitement calme, il paraît à sa « surface des bandes étroites, semblables à de petits ruis- « seaux, et dans lesquels les eaux coulent avec un bruit « très-sensible à l'oreille d'un pilote expérimenté. Le « 15 juin, par les 34° 36′ de latitude boréale, nous nous « trouvâmes au milieu d'un grand nombre de ces lits de « courants; nous pûmes en relever la direction avec la « boussole. Les uns partaient au nord-est, d'autres à « l'est-nord-est, quoique le mouvement général de « l'Océan, indiqué par la comparaison de l'estime et de « la longitude chronométrique, continuât à être au sud- « est. Il est très-commun de voir une masse d'eau immo- « bile, traversée par des filets d'eau, qui coulent dans « différentes directions. On peut observer ce phénomène « journellement à la surface de nos lacs; mais il est

(1) *Voyages aux régions équinoxiales*, t. I, p. 153.

« plus rare de trouver des mouvements partiels, imprimés par des causes locales à de petites portions d'eau, « au milieu d'une rivière pélagique qui occupe un « espace immense, et qui se meut dans une direction « constante, quoique avec une vitesse peu considérable. « Dans ce conflit de courants, comme dans l'oscillation « des vagues, notre imagination est frappée de ces mou- « vements qui semblent se pénétrer, et dont l'Océan est « sans cesse agité. »

Cause des courants. — Plusieurs causes ont été assignées aux courants, par Franklin, Rennel, etc. Bernouilli avait admis que le mouvement de rotation de la terre laissant en retard les eaux et l'atmosphère, il devait en résulter des courants marins et atmosphériques équatoriaux en sens inverse du mouvement de rotation de la terre ou de l'est à l'ouest. D'Alembert, Laplace, n'ont pas trouvé les raisons de Bernouilli suffisantes pour admettre cette cause des courants marins et des vents alizés.

On a pensé que les vents alizés, dont il sera question plus loin, qui soufflent constamment dans les mers équatoriales de l'est à l'ouest, produisent une intumescence liquide dans le voisinage de l'équateur, sur la côte orientale d'Afrique, d'où résulte une masse d'eau accumulée, qui s'écoule sans cesse du nord au sud, par le détroit de Mozambique. Arrivée au Cap, n'étant plus arrêtée par les côtes d'Afrique, elle se précipite vers l'ouest. Telle est la cause qu'on a assignée au courant du cap Bonne-Espérance.

Suivant cette manière de voir, le courant équinoxial de l'Atlantique aurait une origine semblable; en effet, l'impulsion constante du vent alizé sur les eaux qui avoisinent l'équateur au nord et au midi, doit produire aussi une grande accumulation d'eau sur la côte d'Amérique; de là résulte un mouvement général de la mer des Caraïbes, vers le détroit qui sépare la pointe orientale de Yucatan de la pointe occidentale de Cuba; de là une élévation du niveau de la mer dans le golfe du

Mexique, et par suite production de ce courant, qui, en sortant par le détroit de Bahama, forme le Gulf-Stream.

On attribue le courant du détroit de Gibraltar au niveau plus bas de la Méditerranée, lequel serait dû à une évaporation abondante, que ne compensent pas, à beaucoup près, les eaux déversées dans cette mer par les fleuves qui y débouchent; évaporation qui doit être plus forte que sur l'Océan, puisque, à égalité de température, les eaux de la Méditerranée ont une température de 3° à 3°,5 plus élevée que celles de l'Océan.

Il est impossible de donner une théorie complète des courants, vu l'ignorance où l'on est de toutes les causes qui interviennent dans leur production; il ne suffit pas en effet de connaître seulement les courants qui sillonnent la surface des mers, mais il faudrait avoir quelques notions sur les courants produits par les différences de température et de salure à toutes les profondeurs, et les courants sous-marins en contact avec le lit même de la mer, qui transportent jusque sous l'équateur les eaux froides des zones polaires. D'un autre côté, les eaux de l'Océan, près des pôles, sont mues d'occident en orient avec une très-faible vitesse par suite du mouvement diurne; en s'acheminant vers des régions tempérées et chaudes, leur mouvement s'accélère, et il en résulte des courants relatifs, dirigés de l'orient à l'occident

Les courants que nous avons décrits ne sont donc que les effets provenant de l'état final dans lequel se trouve la surface des mers, sous les influences combinées des causes si complexes dont il a été question.

Nous sommes entré dans quelques détails sur la direction des principaux courants, parce qu'ils nous permettent d'étudier les émigrations, dans toutes les parties du monde, des plantes, des insectes et même des oiseaux, dont les graines, les germes et les œufs sont transportés par les glaces et les bois qui flottent à leur surface.

§ III. — *De l'action destructive des eaux.*

L'eau agit, soit mécaniquement, soit chimiquement, sur les corps qui composent l'écorce terrestre. Dans les deux cas, son action est destructive et reproductive; dans le premier, lorsqu'elle est violemment agitée ou qu'elle se meut avec vitesse, elle sépare les éléments des roches, et n'est reproductive que lorsqu'elle forme des dépôts, des alluvions; dans le second cas, elle peut dissoudre certaines substances, faire naître des réactions entre les éléments des roches, puis transporter les sels dissous dans l'eau de la mer et augmenter sans cesse la salure, ou bien déposer les substances avant d'arriver à l'Océan. Dans toutes ces circonstances, elle semble agir pour niveler la surface du globe et entraîner dans les vallées les éléments qui composent les montagnes. Nous traiterons à la fin de cet ouvrage de l'action de l'eau comme agent chimique : dans ce paragraphe nous nous bornerons à parler de l'action mécanique de l'eau en mouvement, c'est-à-dire des cours d'eau et des vagues.

A la surface du globe, la presque totalité des eaux est à l'état liquide; il n'y en a qu'une fraction très-minime dans l'atmosphère à l'état de vapeur; nous verrons en effet dans l'hygrométrie que cette quantité n'équivaut pas au plus à une couche d'eau de 1 décimètre d'épaisseur qui couvrirait la surface du globe. Or, puisque, d'après ce que l'on a vu, l'eau qui constitue les mers ne formerait pas au maximum une couche de 1000 mètres de hauteur couvrant toute la terre, il s'ensuit que la quantité de vapeur qui existe en moyenne à un instant déterminé dans l'atmosphère n'excède pas les $\frac{0.1}{1000}$ ou $\frac{1}{10000}$ de la masse totale des eaux de l'Océan. Cette eau se condense continuellement sur toute la surface du globe, et en retombant à l'état de pluie, de neige, forme les sources, les ruisseaux, les rivières et les fleuves. Mais l'eau retourne-t-elle en totalité à la mer, par les fleuves, ou par les cours d'eau souterrains, abstraction faite d'une petite fraction de ce liquide qui se

trouve fixée, soit pour former des hydrates, soit par les corps organisés? Voici ce que nous savons à cet égard :

On a essayé de déterminer dans certaines circonstances la proportion de l'eau tombée à l'état de pluie qui retourne à la mer par les fleuves. Mariotte avait annoncé que la Seine ne versait chaque année dans la mer que la $\frac{1}{6}$ partie de la quantité d'eau qui tombe dans son bassin sous tous les états ; les $\frac{5}{6}$ devant ou s'évaporer ou être absorbés par la terre, pour servir à la vie organique, ou retourner à la mer par des voies souterraines. M. Dausse a repris cette question en s'occupant du jaugeage de la Seine. Voici les résultats auxquels les observations et le calcul l'ont conduit ; le bassin de Paris, en le terminant à Paris, où l'on a jaugé les eaux qui passent sous l'un des ponts, a 4327000 hectares. Si toute l'eau qui y tombe n'éprouvait aucune perte, elle formerait au bout de l'année une couche de 53 centim. de hauteur; toute cette quantité est équivalente à 22933 millions de mètres cubes. Or, au pont de la Chambre des députés, le débit moyen est de 255 mètres cubes par seconde, ou 22 millions par jour, et 8042 millions de mètres cubes par an. Ce nombre : 22933 : : 1 : 3; ainsi les $\frac{2}{3}$ de l'eau qui tombent dans le bassin de la Seine jusqu'à Paris ne se rendent pas dans la mer. Mariotte avait trouvé $\frac{5}{6}$; il n'y a qu'une différence de $\frac{1}{6}$ seulement entre ces deux résultats.

L'eau qui tombe à la surface de la terre et qui se rend à la mer, soit en s'écoulant à la surface, soit par des voies souterraines, agit sur les roches et produit des effets mécaniques, dont la puissance est bien diminuée à l'époque actuelle où il y a moins de vapeur dans l'air, mais qui cependant, comme on va le voir, a encore une grande énergie. Elle agit d'abord par sa chute, ensuite par sa vitesse, en coulant sur le sol ou dans la terre. Lorsqu'elle parcourt des voies souterraines, elle peut miner les terrains, et il en résulte des éboulements qui ont produit souvent des effets désastreux; nous citerons, par exemple, l'éboulement de la montagne de

Rossberg, située en face du Righi en Suisse, dans la vallée de Goldau. Mais quel que soit le mode suivant lequel l'eau parvient à la mer, son action commence aussitôt qu'elle touche la terre, et ne s'arrête que lorsqu'elle est arrivée dans son grand réservoir, où elle produit d'autres effets. A mesure qu'elle avance, elle dissout les éléments solubles, corrode certains terrains sur lesquels elle passe, emporte les débris, et les abandonne quand sa vitesse diminue. C'est ainsi que les dépôts se forment à l'entrée des fleuves et que les deltas prennent naissance; ce phénomène, qui, de prime abord, semble bien minime, grandit à mesure qu'on l'examine de plus près, et nous révèle une action destructive à la surface des continents.

Les fleuves et les rivières apportent donc continuellement dans les bassins des mers des matériaux solides, débris des continents, qui forment sans cesse des atterrissements, et qui finiraient dans la suite des siècles par niveler la surface de la terre, si les révolutions, les mouvements de la croûte et l'action des vagues et des courants qui refoulent dans certains endroits les matériaux solides renfermés dans son sein, ne produisaient pas des élévations, et ne changeaient pas les contours des rivages.

Pour montrer la puissance de cette action mécanique de l'eau, nous citerons quelques nombres indiquant la quantité de matériaux solides qui sont transportés continuellement par les rivières et les fleuves. La plupart des grands cours d'eau n'ont guère que $\frac{1}{2}$ mètre à 1 mètre de pente par cinq kilomètres. Le Mississipi, un des plus grands fleuves connus, a 60 centim.; le Rhône, de Lyon à la mer, a 2 mètres $\frac{1}{2}$ de pente; encore une partie se trouve-t-elle en soubresauts. Dans les torrents, la pente est beaucoup plus grande. On admet pour les matériaux solides tenus en suspension dans les eaux, en moyenne $\frac{1}{60}$ pour le Pô, $\frac{1}{160}$ pour le Nil; le Rhin, suivant une évaluation, tiendrait $\frac{1}{100}$, et le fleuve Jaune en Chine $\frac{1}{200}$.

Le major Rennel, qui a cubé la masse d'eau que le Gange porte à la mer, l'a évaluée en moyenne à 5040 mètres cubes par seconde. Lors des plus fortes crues, la masse d'eau va à 11490 mètres cubes, et dans ce cas, à ce qu'il paraît, l'eau pouvant tenir $\frac{1}{4}$ de matières solides en suspension, la masse équivaudrait à 2850 tonnes par seconde; ce fleuve entraînerait donc dans cette circonstance 1 kilomètre cube de matière solide en dix jours, en supposant que 2,7 soit la densité de ces matières. En moyenne, d'après cette densité, le Gange entraînerait 1 kilomètre cube de matériaux terreux toutes les trois semaines.

On ne peut guère évaluer en moyenne à plus de 100 centimètres la quantité d'eau qui tombe par an dans les divers lieux de la terre. Admettons ce nombre, et supposons que $\frac{1}{3}$ de l'eau seulement retourne à la mer par les fleuves et les rivières; si de plus cette eau tient en suspension $\frac{1}{100}$ de matériaux solides, alors la quantité de ces substances qui arriverait à la mer serait capable, en un an, de former une couche qui, répandue sur toute la terre, aurait une épaisseur de $\frac{1^{m}}{3} \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{2,7} \cdot \frac{1}{4} = 0,^{mm}3$, la densité de ces substances étant évaluée en moyenne à 2,7, et les terres n'occupant que le $\frac{1}{4}$ de la surface du globe; cela ferait en 100 ans $30^{millim.}$, ou bien 3 mètres en dix mille ans. En admettant seulement $\frac{1}{500}$ de matériaux solides, la quantité qui serait apportée dans la mer pendant cette période de dix mille ans, étant répandue sur tout le globe, donnerait encore une couche solide de 6 décimètres d'épaisseur.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que les matières transportées par les eaux étaient réduites à l'état pulvérulent; mais dans les lits des torrents, des rivières et des fleuves, on trouve des fragments de toute dimension et de toute espèce, et on suit les altérations qu'ils ont éprouvées. Ceux qui sont calcaires sont altérés les premiers, ils disparaissent au bout d'un certain temps; les roches schisteuses s'altèrent aussi rapidement, tandis que le quartz et les basaltes résistent plus

que tous les autres. Les matières organiques, telles que le bois, qui sont entraînées par les cours d'eau, éprouvent aussi un effet analogue, d'après lequel les matériaux solides, débris des continents, apportés dans l'Océan, tendent toujours à se diviser de plus en plus et à se mélanger.

Lorsque les matériaux sont arrachés au sol, ils sont entraînés plus ou moins loin, suivant la vitesse de l'eau, leur densité et leur grosseur. Si cette vitesse n'est pas au moins de 5 à 6 centimètres par seconde, elle ne peut entraîner que des particules très-ténues qui ont moins de $0^{\text{millim.}},1$ de diamètre. Avec une vitesse de 15 centimètres, elle peut entraîner du sable de 1 millimètre de diamètre; quand elle atteint près de 50 centimètres par seconde, elle peut mouvoir des cailloux de 1 centim. de diamètre; et avec une vitesse de 1 mètre, des galets de 5 centimètres de diamètre. Avec une vitesse beaucoup plus grande elle enlève les gros blocs de pierre. Mais il faut ajouter que l'eau, en se chargeant d'une grande quantité de limon, et devenant boueuse, peut augmenter de force mécanique; il lui faut alors moins de vitesse pour entraîner ces masses (1).

Cette vitesse nécessaire pour déplacer les roches, les vagues de l'Océan peuvent l'acquérir; car des pièces de 6000 kilogrammes que Bremontier avait placées à Saint-Jean-de-Luz, ont été déplacées par les flots. M. Harris rapporte que pendant les deux tempêtes qui ravagèrent la côte méridionale de l'Angleterre, en 1824 et 1829, des blocs de calcaire et de granit du poids de 2 à 5 mille kilogrammes furent lancés sur la jetée de Plymouth.

Les torrents donnent lieu à des effets analogues; on peut citer comme exemple ce qui s'est passé en 1818, dans la vallée de Bagnes, qui remonte jusqu'au grand Saint-Bernard d'une part, et se rend de l'autre dans le

(1) Voyez l'appendice à la fin de l'ouvrage pour ces calculs approximatifs.

Valais ou la vallée du Rhône. A la partie supérieure de cette vallée se trouvait un glacier qui s'est éboulé et a barré la vallée, d'où est résulté un lac immense du côté de la montagne. L'éruption a été si puissante que d'énormes rochers ont été lancés en l'air et transportés à des distances considérables. Des maisons et des forêts entières ont été emportées; les bois, transportés avec une masse considérable de matières terreuses, se sont déposés en couches alternant avec des couches de boue: image de la formation des lignites.

Des effets puissants de dégradations produits par l'accumulation des eaux ont pu, en agissant sur une plus grande échelle, opérer l'ouverture du Bosphore, celle du détroit de Cadix et de la Manche.

Lors de l'éboulement qui eut lieu à la Dent du Midi, dans les Hautes-Alpes, le 26 août 1835, M. Élie de Beaumont vit des torrents de boue provenant de l'éboulement, qui ne renfermaient pas $\frac{1}{10}$ d'eau, et qui déplaçaient des roches calcaires de plusieurs mètres de côté, flottant même sur leur surface, pendant des espaces considérables, comme des glaçons flottent à la surface des rivières.

Si les eaux qui proviennent de la condensation des vapeurs atmosphériques ravinent la terre et dégradent les continents, celle qui se trouve dans les grands bassins produit aussi des actions très-énergiques. En effet, les marées, les vents et les courants, concourent à maintenir les eaux des mers dans un état continuel d'agitation. Les mouvements des vagues, qui sont quelquefois si énergiques à la surface de la mer, se transmettent jusqu'à une certaine profondeur. D'après les observations de M. Siau (*Annales de physique et de chimie*, 3e série, tome II, page 118, année 1841) et les recherches de M. Aimé (même ouvrage, tome V, page 417), non-seulement à une certaine distance, les molécules d'eau ont un mouvement oscillatoire vertical, mais encore un mouvement oscillatoire horizontal; de façon que jusqu'à 188 mètres M. Siau a pu reconnaître au fond de la mer des zones de gravier d'inégale grosseur

disposées parallèlement par suite du mouvement oscillatoire de la masse liquide.

Lorsque les ondulations de la mer, qui se prolongent jusqu'à une grande distance, rencontrent tout à coup un ressaut, alors l'eau est refoulée vers la surface et peut s'élever à une assez grande hauteur; il se forme dans ce cas des flots de fond, qui ont été l'objet de recherches de la part de M. le colonel du génie Emy. Ces flots, en s'avançant vers le rivage, se soulèvent, se gonflent de plus en plus et forment des nappes écumantes que l'on nomme nappes de déferlement. Si les flots frappent des côtes abruptes, ils y produisent les mêmes effets. Le rocher qui a reçu le nom de la Femme de Lot, dans l'archipel des îles Mariannes, a une hauteur de 117 mètres, et cependant les vagues viennent se briser contre son sommet. Il est probable que ses bords sont abruptes, et que les mouvements de la mer, qui se communiquent de proche en proche jusque vers l'eau qui les baigne, en vertu de la vitesse acquise, occasionnent ces effets.

Un banc de sable en pente douce ne présente pas de flots de fond.

Cette action des flots de fond sur les rivages peut devenir très-considérable, quoiqu'en pleine mer elle soit à peine sensible; les ondulations se propagent toujours de proche en proche jusqu'à ce qu'elles aient trouvé des ressauts. Lorsque ces phénomènes se passent à l'embouchure des fleuves, ils prennent le nom de ras de marée; on a remarqué que, lorsqu'ils se manifestent dans les parages des Antilles, à peu de distance des côtes la mer est fort calme.

Il est facile de concevoir, d'après ce qui précède, comment les actions combinées des vagues, provenant des marées, des vents ou des mouvements quelconques de l'Océan, dégradent sur certaines côtes les rochers, sur d'autres au contraire déposent des matériaux; c'est ce qui arrive en France. Quelques parties des côtes de Normandie se dégradent, tandis que sur les côtes des Landes il y en a qui se recouvrent de sable. Le premier effet

est dû à l'escarpement plus ou moins grand des rivages, et à la nature des roches qui les composent. Ces érosions, qui se manifestent sur presque toutes les côtes, montrent que l'Océan lutte presque continuellement contre les continents, et que, dans certaines contrées, des côtes auraient été entraînées dans la mer si l'homme n'y eût pas mis obstacle.

L'action destructive de la mer se continue tous les jours. On ne sait où s'arrêtera l'action de cet agent qui tend à niveler la surface de la terre, et qui détruit d'un côté et dépose de l'autre les débris des roches; il est probable que plusieurs péninsules se détacheront des continents; peut-être l'isthme de Panama tombera-t-il un jour sous l'action érosive des flots. On ne peut prévoir quelle sera la figure des terres sous les actions combinées des vagues et des changements qui résultent des mouvements dus au refroidissement du globe.



CHAPITRE IV.

DE L'ATMOSPHÈRE.

SECTION Ire.

§ I. — *Étendue de l'atmosphère.*

La terre est partout entourée d'un fluide rare et transparent appelé air. Cette enveloppe, qui a la même forme que notre globe, le sépare des espaces célestes, et constitue l'atmosphère : la terre et son atmosphère se trouvent donc isolés au milieu du vide.

Cette enveloppe n'a pas une étendue indéfinie, et bien qu'elle ne soit pas connue, il est probable qu'elle est très-limitée. Quant à son poids, il est déterminé par le baromètre, puisque le poids d'une colonne d'air qui aurait pour base l'unité de surface, et pour hauteur la hauteur verticale de l'atmosphère dans un lieu quelconque, fait équilibre au poids de la colonne barométrique de même base : or, comme en moyenne, à la surface de la mer, la hauteur barométrique est sensiblement égale à $0^{m},76$ de mercure, il en résulte que le poids total de l'atmosphère est égal à celui d'une couche de mercure de $76^{centi.}$ de hauteur, et qui aurait pour surface celle de la terre ; ou bien fait équilibre au poids d'une colonne d'eau de même base et de $10^{m},3$ de hauteur.

Si l'air conservait à toutes les hauteurs la même densité qu'à la surface de la terre, et que la température ne changeât pas, en s'élevant de $10^{m},5$ à peu près, la hauteur barométrique s'abaisserait de $1^{mill.}$, d'après le rapport de densité entre l'air et le mercure; ainsi la

colonne atmosphérique située au-dessus d'un observateur équivaudrait à une colonne d'air de 7980^{m}, et n'aurait que deux lieues de hauteur. Mais l'air étant élastique et compressible, sa densité est proportionnelle au poids qui le comprime ; les couches inférieures doivent donc être plus denses que les couches supérieures, et l'on doit considérer l'atmosphère comme composée de couches concentriques superposées, sensiblement sphériques, entourant la terre, et *d'autant plus denses qu'elles sont plus rapprochées de sa surface.*

En supposant que la température et la composition de l'air soient invariables, pour des hauteurs croissant en progression arithmétique, les densités correspondantes diminueraient en progression géométrique. Mais la diminution de densité des couches d'air, en s'élevant dans l'atmosphère, ne suit pas rigoureusement cette loi, attendu que la température va en décroissant à mesure que la hauteur augmente, en faisant toutefois abstraction des anomalies accidentelles que l'on observe dans quelques parties basses, et qui proviennent du sol, du rayonnement et de l'humidité.

La loi suivant laquelle la température décroît avec la hauteur n'est pas encore bien connue ; dans la couche inférieure de l'atmosphère, elle varie suivant l'heure de la journée, les saisons, la nature du sol et la latitude. Cette question nous a déjà occupé en exposant les causes qui font varier la température à la surface du globe. Nous rappellerons seulement que M. de Humboldt (page 114), dans la discussion des observations, a trouvé : de 0^{m} à 4000^{m} un degré d'abaissement de température par 187 à 190^{m} de hauteur. Dans la zone tempérée, de 0^{m} à 2900^{m}, un abaissement de 1° par 150 à 170^{m}. Dans les régions polaires, la commission scientifique a trouvé 1° par 172^{m}.

Quand on cherche la densité de l'air à diverses hauteurs, il est nécessaire d'avoir égard à la vapeur d'eau qui se trouve contenue dans l'atmosphère, et à laquelle il faut rapporter les hydro-météores, qui exercent une si

grande influence sur les climats. Le décroissement de la température suffit pour limiter la quantité de vapeurs d'eau, puisque cette quantité, même quand il y a saturation, dépend de la température. Nous traiterons ce sujet avec détail en exposant l'hygrométrie.

Pour connaître la hauteur à laquelle s'étend l'atmosphère, il faudrait pouvoir calculer la densité de l'air à diverses hauteurs, abstraction faite des agitations accidentelles, et dans l'état moyen autour duquel oscillent ces perturbations. On y parvient quand on connaît la température de l'air, sa pression et la tension de la vapeur d'eau contenue; en admettant toutefois que l'air, *devenu très-froid* et *très-dilaté*, suit encore la loi de dilatation, et celle de Mariotte, d'après laquelle les espaces occupés par l'air sont en raison inverse des pressions, ce qui n'est pas prouvé. Il faudrait encore, pour avoir une valeur exacte, tenir compte, 1° de la diminution de la pesanteur à mesure que l'on s'élève dans l'air, et en vertu de laquelle les particules sont moins attirées vers la terre; 2° de la variation de la force centrifuge suivant la latitude; mais ces deux variations, à la vérité, sont très-faibles et affectent peu les valeurs cherchées, attendu la très-petite épaisseur de la couche d'air relativement au rayon de la terre. On voit par là que l'on ne peut tirer que des conclusions bornées de l'équation d'équilibre des couches atmosphériques, déduite des lois connues, quand on veut l'appliquer à la détermination de la hauteur de l'atmosphère.

Cette hauteur est limitée, et même la valeur qu'on lui assigne est peu considérable. Si l'air n'avait pas d'élasticité, sa limite serait située aux points où la force centrifuge ferait équilibre à la pesanteur; mais comme cette condition n'existe pas, il est nécessaire que son élasticité soit équilibrée par une force quelconque; cette force est le poids des couches d'air qui sont supérieures à celles que l'on considère. Mais à mesure que l'on s'élève, l'air devient plus rare, et arrivé aux dernières couches, rien ne presse sur celles-ci; cependant l'atmosphère étant li-

mitée, comme le démontrent plusieurs phénomènes optiques dont nous parlerons, il est nécessaire que ces couches ne se perdent pas dans l'espace, et que, vu leur raréfaction et leur grand abaissement de température, leur état physique soit modifié de telle sorte que la force élastique soit nulle. Laplace a indiqué cette condition indispensable; Poisson l'a spécifiée, en montrant que l'équilibre serait encore possible avec une densité limite très-considérable, pourvu que le fluide ne fût pas expansible; enfin M. Biot (*Astronomie physique*), qui a résumé ces conditions, indique très-bien cet état des dernières couches atmosphériques non expansibles, en disant qu'elles doivent être comme un « liquide non évaporable. »

L'atmosphère est donc limitée et son poids connu; mais il n'en est pas de même de sa hauteur. Examinons s'il n'est pas possible d'avoir quelques données touchant cette élévation, soit par des observations de température, soit à l'aide des variations de densité de l'air.

M. Biot, en discutant les observations de température que M. Gay-Lussac a faites dans son voyage aérostatique, a été conduit aux conclusions suivantes (1):

A partir de la surface jusqu'à 7000^{m}, hauteur déduite des pressions barométriques, l'abaissement total a été de 38°,40; mais cet abaissement n'a pas été réparti uniformément dans cet intervalle. La vitesse du décroissement fut accélérée à mesure que la hauteur augmentait.

Dans la couche inférieure, 1° répondait à une différence de niveau de 196^{m}; à la hauteur de 6952^{m}, le même abaissement de 1° correspondait à une différence de niveau de 156^{m}; la densité de l'air était alors 0,5 et la pres-

(1) La température à la surface du sol, à 9^{h}40′ du matin, le 29 fructidor an 12, était 27°,75, la hauteur barométrique, 75$^{cent.}$525; au maximum d'élévation de l'aérostat, la colonne barométrique était 32$^{cent.}$88, et la température, 9°,5. L'élévation était alors 6977^{m}4 au-dessus de Paris, ou 7010 mètres au-dessus du niveau de la mer. (*Annales de chimie*, tom. LII, pag. 75.)

sion 0,4342, ces quantités à la surface de la terre étant 1.

Dans vingt-deux stations, où M. Gay-Lussac a pris la température, les densités ont diminué moins rapidement que les pressions. Si la relation qui existait entre les seize dernières eût continué jusqu'à ce que la pression fût nulle, la hauteur totale de l'atmosphère serait d'environ 23000^{m}, et la densité de l'air, à sa limite, aurait été de 0,09666, ou environ de $\frac{1}{10}$ de sa densité primitive, réduit à un état non évaporable, ou liquéfié ou solidifié ; mais cela suppose que les lois de compression et de dilatation soient les mêmes, ce qui n'est pas démontré. En supposant 62300 mètres à l'atmosphère, ou un peu plus de 15 lieues, la densité de la dernière couche serait de $\frac{75}{100000}$ de celle qui est à la surface de la terre.

M. Biot a discuté de même les cinq observations de M. de Humboldt, faites en juin 1802 sur la Chimborazo, la dernière ayant eu lieu à 5879 mètres, et celles qui ont été faites en 1827, par M. Boussingault, sur le Chimborazo et l'Antisana, jusqu'à des hauteurs de 5900 et 5400 mètres; ces observations l'ont conduit aux mêmes résultats.

Nous donnerons plus loin, en parlant du crépuscule, d'autres indications sur la hauteur totale de l'atmosphère; mais d'après ce que nous venons de dire, on voit que cette hauteur, qui n'est pas connue, n'est pas inférieure à 10 lieues. Suivant toute probabilité, elle est au moins de 16 à 20 lieues. Il peut se faire cependant que des particules d'air très-rares puissent s'étendre au delà, comme il en sera question en parlant de l'aurore boréale; cette question n'est pas encore résolue. On peut admettre par approximation, quant à présent, que la hauteur de l'atmosphère est à peu près le $\frac{1}{80}$ du rayon terrestre. Ainsi, en représentant par le nombre proportionnel 80 le rayon terrestre qui a 1500 lieues, l'épaisseur de la croûte consolidée et celle de l'atmosphère peuvent être représentées toutes deux par 1.

L'atmosphère, évaluée en poids à plus de 10^{m} d'eau, pèse sur tous les corps situés à la surface de la terre,

et par sa pression tend à pénétrer partout, entre les molécules des liquides comme dans les interstices des roches; l'eau en contient, de même que les végétaux et tous les composés organiques; la terre, les pierres poreuses en sont imprégnées, et cela d'autant plus que la pression est plus considérable. On voit donc que l'air qui se trouve à la surface de la terre n'est pas limité à la portion qui est à l'état gazeux dans l'atmosphère, et qu'une fraction notable de ses éléments constituants a pénétré les eaux de l'Océan et les interstices des terrains. Quelques personnes ont été jusqu'à supposer que l'air qui compose l'atmosphère n'était qu'une partie de l'atmosphère intérieure qu'ils supposaient devoir exister; mais l'élévation de température due à la chaleur centrale s'oppose à la condensation des gaz, et doit limiter la présence de l'air dans les couches profondes.

Il est facile d'avoir une valeur approchée de la quantité d'air qui est ainsi engagée dans les eaux de l'Océan : cela résulte des observations que l'on a faites sur l'absorption des gaz par les liquides. A la pression ordinaire de $76^{cent.}$, l'eau de mer absorbe à peu près entre deux et trois centièmes de son volume d'air : seulement, la proportion d'oxygène est plus forte que dans l'air ordinaire (1). Cette proportion de gaz dissous dans l'eau augmentant avec la pression, de telle sorte que, d'après la loi de Dalton, le volume de gaz dissous reste le même sa force élastique étant changée, on serait porté à croire

(1) D'après un travail récent de M. Lewy (*Ann. de phys. et de chim.*, 3e série, t. XVII, p. 5), l'eau de mer, à sa surface, contient sur $4^{lit.},45$, en moyenne à peu près $92^{cent.\ cub.}$ de gaz à la pression de $76^{cent.}$ Ce gaz est en moyenne un mélange de $14^{cent.\ cub.}$ d'acide carbonique, 26 d'oxygène et 52 d'azote, plus un peu d'hydrogène sulfuré; en outre, dans le courant de la journée, les proportions de ces gaz éprouvent des variations : l'oxygène se montre un peu plus fort le soir que la nuit, et l'acide carbonique marche en sens inverse; l'action de la lumière sur les matières organiques joue le principal rôle dans ces variations. En général, l'air qui est en dissolution dans l'eau contient 32 pour 100 d'oxygène, tandis que dans l'air la proportion est de 21 pour 100.

que de l'eau puisée à 1000 mètres, et supportant une pression de 100 atmosphères, contient 100 fois plus de gaz que celle qui stationne à la surface de la mer. Or les résultats de quelques expériences sont en désaccord avec cette théorie : l'eau de mer puisée à diverses profondeurs renferme à peu près la même quantité absolue de gaz. M. Aimé (*Annales de physique et de chimie*, 3[e] série, t. VII, page 501) rend compte de cette anomalie, en supposant que le gaz absorbé, glissant entre les pores des liquides, se répand uniformément de la surface au fond, car l'eau est très-peu compressible, et la pression des particules liquides doit être supportée par l'eau elle-même. Dans cette hypothèse, la force élastique du gaz dissous doit néanmoins augmenter de la surface au fond, ces gaz étant pressés par le poids des couches gazeuses supérieures; mais vu la faible proportion de ces éléments, il est permis dans le calcul de négliger cette augmentation. On peut donc admettre en résumé $\frac{2,5}{100}$ de l'air en volume dans la masse des eaux de l'Océan ; à peu près $\frac{2,5}{100} \cdot \frac{13}{10000}$ en poids, ou bien $\frac{33}{1000000}$. Or, en supposant que la masse des eaux de l'Océan équivaille à peu près à 1000 mètres d'eau répandue sur tout le globe, le poids de l'air contenu dans cette masse serait $\frac{33}{1000000}$ de 1000 mètres d'eau, ou bien équivalente à une couche d'eau de 33 millimètres. La quantité d'air qui est ainsi absorbée dans l'Océan ne dépasse donc pas le $\frac{33}{10300}$ ou $\frac{1}{300}$ de la masse d'air restée dans l'atmosphère.

L'atmosphère pressant sur tous les corps qui sont à la surface de la terre, l'homme, qui présente une superficie d'environ $1^{m},5$, supporte donc une pression de plus de quinze mille kilogrammes, qui ne l'affecte pas, tant que les fluides renfermés dans l'intérieur de son corps ont une force élastique capable de lui faire équilibre. Si cette force élastique diminue, la pression atmosphérique influe. Voilà où il faut aller chercher les causes de l'influence qu'exercent les variations barométriques sur les phénomènes de la vie organique.

Pour s'en convaincre, il suffit de s'élever dans un ballon ou de gravir une montagne très-élevée ; le poids de l'air extérieur ne suffisant plus pour comprimer les liquides et les gaz que renferme notre corps, la respiration devient haletante ; les poumons fonctionnent plus rapidement, parce qu'ils ont besoin de la même quantité d'oxygène pour entretenir la vie; il arrive enfin un instant ou le sang passe du dedans au dehors, d'où résulte les saignements de nez et les hémoptysies auxquelles sont sujettes les personnes qui habitent les hautes régions du globe. C'est pour ce motif que les religieux du grand Saint-Bernard ne peuvent habiter l'hospice que pendant quelques années.

La diminution de pression avec la hauteur influe sur les qualités des eaux dans les régions élevées, et par conséquent sur la vie organique. En effet l'eau coulant à la surface de la terre renferme toujours de l'air, qui contient plus d'oxygène que l'air libre; cet air s'échappe du liquide en s'élevant dans l'atmosphère par suite de la diminution de pression : or l'eau convenant d'autant mieux à l'économie animale qu'elle renferme plus d'air, puisqu'en sortant des sources elle affecte souvent les organes de la digestion, il s'ensuit que, sur les hautes montagnes, elle est moins potable qu'à la surface de la terre, c'est-à-dire au niveau des mers.

Le baromètre donnant le poids de la colonne d'air qui se trouve située au-dessus de l'observateur, il en résulte que la hauteur de la colonne diminue à mesure que l'on s'élève dans l'air. On s'est proposé de déduire la hauteur dont on s'est élevé, de la différence des deux colonnes de mercure, au niveau du sol et au haut de la station. La solution de ce problème est assez compliquée, attendu qu'elle dépend des variations de la densité de l'air, des causes sans nombre qui troublent sa température, et du degré d'humidité des couches atmosphériques; néanmoins on est parvenu à établir une équation qui donne assez exactement les hauteurs quand on connaît ces divers éléments.

Afin d'éviter les calculs qu'exige la formule que nous rapporterons dans l'appendice, à la fin de cet ouvrage, on a fait des tables qui donnent les hauteurs des montagnes ou des élévations, lorsqu'on connaît les divers éléments de hauteurs barométriques, de température. Une des tables les plus commodes est celle d'Oltmanns; on la trouve dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*. (*Voyez* l'appendice à la fin de l'ouvrage.)

Nous n'entrerons dans aucun détail touchant la forme et l'usage du baromètre; cet appareil, l'un des plus précieux de la physique, conjointement avec le thermomètre, doit toujours être observé par les météorologistes : il est décrit avec détail dans tous les ouvrages élémentaires de physique, où l'on trouve la disposition des baromètres les plus portatifs, et toutes les corrections nécessaires relatives à la température et à la capillarité.

§ II. — *Composition de l'atmosphère.*

L'air pris à une certaine distance de la surface terrestre a toujours sensiblement la même composition, abstraction faite de la vapeur d'eau, du gaz acide carbonique, et des matières accidentelles qu'il renferme ordinairement.

D'après les dernières analyses faites par MM. Dumas et Boussingault (*Annales de physique et de chimie*, 3[e] série, t. III, p. 257), sa composition est :

En poids :	En volume :
23,01 d'oxygène	20,81 d'oxygène
76,99 d'azote	79,19 d'azote
100	100

L'air rapporté de 7000 mètres de hauteur par M. Gay-Lussac, lors de son voyaye aérostatique, avait la même composition que celui qui se trouvait à la surface de la terre. Les expériences de M. Boussingault en

Amérique, celles de M. Brunner dans les Alpes, conduisent aux mêmes conclusions. Cette similitude dans les résultats dépend de ce que les courants d'air et les variations continuelles de densité mélangent sans cesse les couches atmosphériques.

En est-il encore de même à des hauteurs plus considérables? Cela n'est pas probable; car l'azote et l'oxygène étant à l'état de mélange et non de combinaison, les gaz doivent s'arranger suivant l'ordre des densités, eu égard, bien entendu, à la loi d'expansion, c'est-à-dire qu'ils se comportent comme deux atmosphères distinctes, le plus dense devant s'étendre moins loin que l'autre; de sorte que la proportion d'azote, dont la densité est 0,972 celle de l'air étant 1, doit s'accroître à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère; tandis que l'oxygène, dont la densité est 1,057, et qui est le plus dense, doit se trouver en plus grande proportion à la surface. Suivant cette hypothèse, à 7000 mètres, ces derniers gaz n'entreraient plus que pour 19 centièmes dans le volume de l'air; mais, jusqu'à présent, l'expérience n'a pu constater une telle différence, attendu que cette évaluation suppose l'air tranquille, et qu'entre ces limites il est continuellement agité.

La composition de l'air varie entre de très-faibles limites : quand il pleut, l'eau condensée dissout plus d'oxygène que d'azote; quand il gèle, l'eau abandonne ces mêmes gaz; l'eau qui s'évapore en rend aussi à l'atmosphère.

L'air, outre l'oxygène et l'azote, renferme du gaz acide carbonique, dont la quantité est en moyenne de $\frac{4}{10000}$ du volume de l'air; il est probable que cette proportion n'a pas été la même aux différentes époques géologiques, comme nous l'avons dit en parlant des climats; mais actuellement elle varie peu, car la quantité qui s'échappe des volcans du Nouveau-Monde est à peine appréciable, eu égard à la grande masse de l'atmosphère. Ce gaz est essentiel à la vie végétale; les animaux, par l'acte de la respiration, sont de véritables foyers de combustion, qui rendent sans cesse à l'air des quan-

tités d'acide carbonique équivalentes à peu près à celles que consomment les plantes; mais la tendance des gaz à se mélanger, et les vents, tendent à faire disparaître les différences momentanées dues à ces causes secondaires. Elles ont été cependant appréciées par M. Th. de Saussure, qui a fait un travail très-étendu sur les variations de l'acide carbonique, duquel il résulte que l'air, à midi, renferme $\frac{3,98}{10000}$, et pendant la nuit $\frac{4,32}{10000}$ de son volume de gaz acide carbonique; en moyenne à peu près quatre dix-millièmes. Les deux causes principales auxquelles ce chimiste attribue les variations de ce gaz, sont : 1° les changements qu'éprouve le sol, soit par son humectation, qui soustrait l'acide carbonique, soit par la sécheresse, qui le développe; 2° les influences opposées de la nuit et du jour, l'obscurité augmentant et le jour diminuant la proportion de ce gaz. Il a constaté, en outre, que les couches supérieures renferment plus d'acide carbonique que les inférieures; que la variation, pendant le jour et la nuit, n'est que peu ou point sensible dans les couches supérieures; qu'un vent violent augmente ordinairement pendant le jour l'acide carbonique dans les couches atmosphériques inférieures, et il y détruit, en tout ou en partie, l'augmentation que ce gaz éprouve, dans un temps calme, par l'influence de la nuit.

On ignore si les variations, dans la quantité de gaz acide carbonique qui se trouve dans l'air, peuvent exercer une influence sur l'économie générale de la nature; mais il est indispensable de les signaler comme éléments météorologiques. Quoi qu'il en soit, on peut rapporter sa disparition plus ou moins grande, pendant le jour, à la quantité qui sert à la nutrition des plantes; et comme ses proportions sont relatives à la nature du terrain et à son degré d'humidité, elles doivent être prises en considération dans la salubrité des climats. On ne sait si la proportion d'acide carbonique restera toujours la même, et si les diverses causes qui tendent à le produire ou à l'absorber se contre-balancent actuellement; l'avenir seul et les expériences qui se continueront pen-

dant un très-grand laps de temps, pourront décider la question.

On trouve encore dans l'air, quoique en très-petite quantité, des matières hydrogénées, de l'ammoniaque, du gaz des marais, et enfin une foule de produits accidentels qui échappent à l'analyse. L'électricité atmosphérique, dans ses décharges, produit aussi nécessairement des combinaisons, telles que l'acide azotique, l'ammoniaque; substances que l'on retrouve dans les pluies d'orage et qui retombent sur le sol. Nous mentionnerons encore cette poussière, qui devient visible quand on se trouve dans une pièce qui n'est éclairée que par un faisceau de lumière directe; on ne sait pas si cette poussière contient des germes appartenant à la nature organique, d'espèces microscopiques. Nous devons ajouter également que dans l'air se trouve des émanations organiques, et des miasmes qui produisent des maladies épidémiques (voyez la *Météorologie agricole* de M. Gasparin, t. II, page 35 et suivantes), mais on ne sait rien de bien positif à cet égard.

SECTION II.

DES VENTS.

Dans tout ce qui précède, on a supposé que l'air était calme et que les molécules ne se déplaçaient pas; mais ce *statu quo* n'est pas possible, et l'atmosphère est continuellement agitée. Les causes qui troublent cet équilibre sont nombreuses, et produisent des effets très-variés.

Si, par un motif quelconque, l'air devient plus dense ou moins dense, ou se trouve plus ou moins pressé dans une région de l'atmosphère, il s'écoule vers la partie la moins dense ou la moins comprimée, et ce déplacement donne lieu à un courant d'air. L'action inégale de la chaleur, c'est-à-dire les variations de volume de l'air échauffé ou refroidi, et la condensation ou la formation subite des

vapeurs, sont les causes prédominantes de ces courants aériens, que l'on nomme vents. Il faut peut-être encore y joindre les changements que la rotation de la terre produit dans les vitesses relatives des molécules d'air, lorsque ces molécules se déplacent dans le sens des méridiens, et les actions qui peuvent se manifester par suite des attractions et des répulsions électriques. Ces mouvements ne sont pas les seuls déplacements atmosphériques que l'on observe; il y a encore des variations régulières et irrégulières dans la marche du baromètre, variations qui indiquent des oscillations ou des ondulations dans la masse gazeuse qui enveloppe le globe.

§ I. — *De la direction et de la vitesse des vents, de leur force mécanique.*

Direction des vents. — Il est indispensable de connaître exactement la direction du vent dans une localité, et cela à diverses hauteurs : les girouettes donnent cette indication. Pour rapporter ces directions à des lignes déterminées, on divise l'horizon en un certain nombre de parties égales, dont les quatre principales correspondent à l'orientation adoptée, nord, sud, est, ouest, c'est-à-dire aux quatre points cardinaux. On les désigne par les initiales N., S., E., O.

Lorsque l'on n'a pas besoin d'une grande approximation, les huit directions dont les noms suivent sont suffisantes :

N., N.-E., E., S.-E., S., S.-O., O., N.-O.

Pour plus de précision, on divise la circonférence en trente-deux parties égales, et l'on forme ce que l'on appelle la rose des vents; chaque intervalle s'appelle un rumb; et si le vent change, on dit alors qu'il change de un ou plusieurs rumbs. La figure 2, planche II, représente ces divisions avec leurs dénominations en regard. Si le vent souffle très-près du nord, du côté de l'est, on dit qu'il est N. $\frac{1}{4}$ N.-E., ou (nord $\frac{1}{4}$ nord-est). Quelquefois on se contente, dans l'apprécia-

tion, de la direction de seize divisions; et lorsque, par exemple, le vent souffle entre le nord et le nord-est, on dit qu'il est N.-N.-E.

Enfin, quand on veut avoir cette direction avec toute la précision nécessaire, il faut indiquer, à l'aide des degrés de la circonférence, de combien elle est éloignée de la ligne nord, sud; ainsi N. 30° E. signifie un vent dont la direction fait un angle de 30° entre le nord et l'est à partir du nord, ou dont la direction est éloignée de 30° du méridien du nord.

On a construit des appareils qui marquent eux-mêmes la direction des vents, sans que l'observateur soit continuellement occupé à les observer.

Lorsque l'on veut déterminer la direction des nuages à des hauteurs différentes, direction qui donne celle des courants d'air dans lesquels ils sont placés, on se sert d'un miroir sur lequel sont tracées des raies au diamant, et en examinant la marche des nuages par réflexion dans ce miroir, et ramenant la direction suivant laquelle ils se dirigent, parallèlement aux traits du miroir, puis, examinant l'angle que fait un des traits avec l'aiguille d'une boussole adaptée à côté du miroir, on peut avoir la direction angulaire du mouvement des nuages.

Dans quelques circonstances, lorsque le vent est faible et que les girouettes ne se dirigent pas par son action, on peut, en suivant la direction de la fumée des cheminées, connaître de quel point de l'horizon il souffle.

Vitesse et effets mécaniques des vents. — Pour déterminer la vitesse des courants d'air, on se sert d'anémomètres. On en a construit de différentes formes, fondés sur divers principes; on peut employer avec avantage l'anémomètre de M. Combes, qui donne exactement les vitesses comprises entre 0^{m}, 40 et 5^{m} par seconde. Cet anémomètre (*Annales des mines*, t. XIII, 1838 p. 103), analogne au moulinet de Voltmann, donne la vitesse d'après le nombre de tours qu'un petit moulinet fait effectuer à une roue dentée. On gradue l'appareil par expérience, en parcourant une distance

connue sur une route avec une vitesse déterminée; alors l'appareil étant en mouvement l'effet produit est le même que celui qui aurait lieu si l'appareil restant en place, l'air se mouvait avec la même vitesse. On peut aussi observer la marche de l'appareil dans une plaine, avec un vent ordinaire, dont on mesure l'effet par le transport de corps légers. Quant à la vitesse des nuages, on a proposé de la déterminer de diverses manières, et entre autres, dans quelques circonstances, par la marche de leur ombre sur la terre.

Du reste, on n'a pas encore de séries bien suivies d'observations sur les vitesses des vents, on n'en a que sur leur direction, et même dans les registres météorologiques, on s'est borné à classer les vents en quatre catégories, correspondant aux dénominations de : *vent faible*, *vent modéré*, *vent assez fort*, *vent violent*, représentées par les nombres 1, 2, 3, 4. Il est à désirer que cette lacune disparaisse; mais de graves difficultés ont empêché jusqu'à présent de résoudre cette question.

Nous croyons, toutefois, qu'il est de quelque intérêt de montrer quelle est la puissance des vents, et d'indiquer les observations faites dans quelques cas particuliers. M. Bueck a trouvé à Cuxhaven que la force moyenne des vents était :

N.	6m,78	E.	5m,58	S.	5m,78	O.	7m41
N.-E.	6, 78	S.-E.	5, 75	S.-O.	6, 56	N.-O.	8,90

La direction moyenne étant 275°, c'est-à-dire O.-N.-O., la plus grande force du vent correspond à la direction moyenne. M. de Gasparin (t. II, p. 243) est arrivé à la même conclusion pour Orange. Les deux vents principaux N., S., lui ont donné en moyenne pour le nord 6m,35, et pour le sud 1m,22; le vent du nord dominant dans cette localité, il en résulte que c'est dans cette direction que se trouve également la plus grande force.

La vitesse des vents ordinaires qui soufflent dans nos contrées est à peu près de 5 à 6 mètres par seconde (*voyez* Hachette, *Traité des machines*). Pour les moulins à vent, si la vitesse est moins de 4 mètres, le blé ne peut pas se moudre; le vent le plus favorable est de 6 à 7 mètres; passé 8 mètres, on est obligé de serrer les voiles des moulins, pour éviter la rupture des ailes. Le vent de 6 mètres par seconde tend bien les voiles des vaisseaux, et celui de 9 mètres est très-favorable pour la marche en mer. La vitesse moyenne des vents alizés est de $2^m,5$ à $3^m,2$, par seconde. Mais on observe dans les divers pays des vents de toute intensité, et même quelquefois des ouragans très-violents.

Nous citerons le tableau suivant, qui donne des résultats approchés.

VITESSE DU VENT			
PAR SECONDE.	PAR HEURE.		
mètres	en mètres.	en lieues de 4000 m.	
0,5	1800	0,45	Vent à peine sensible.
1	3600	0,90	Vent sensible.
2	7200	1,80	Vent modéré.
5,5	19200	4,95	Vent assez fort, brise, (tend bien les voiles).
10	36000	9	Vent fort (frais).
15	54000	13,5	Vent fort (grand frais).
20	72000	18	Vent tr.-fort (tr.-gr. frais)
22,5	81000	20,25	Tempête.
27,5	97200	24,3	Grande tempête.
36	129600	32,40	Ouragan.
45	162000	40,50	Ourag. qui renverse les édif. et dérac. les arb.

On peut voir dans l'appendice comment on calcule la force mécanique du vent ; nous nous bornerons à dire ici que, quoique ce sujet soit aussi délicat et aussi peu avancé, expérimentalement parlant, que celui qui a trait à la résistance de l'eau, cependant on peut admettre approximativement que cette résistance est proportionnelle à la surface, et en raison directe du carré de la vitesse; et que pour une vitesse de 1^{m} par seconde, par chaque mètre carré, l'effet produit équivaut à peu près à

$$0^{kil.},125.$$

C'est donc, avec cette vitesse de 1^{m} par seconde, un demi-kilogramme par 4 mètres de superficie.

Dans les tempêtes, dont la vitesse est de 20 mètres à la seconde, sur chaque mètre carré, on a un effet de 50 kilog.; lorsque, dans les ouragans, la vitesse est de 40 mètres, la pression est quadruplée et devient 200 kilog.; on conçoit d'après cela comment des arbres et des maisons peuvent être renversés. Lors de l'ouragan qui dévasta la Guadeloupe en 1825, des tuiles reçurent une telle impulsion, qu'elles traversèrent des portes épaisses; une planche de sapin, de $1^{m.}$ de long, de $2^{deci.},5$ de largeur, et de $23^{milli.}$ d'épaisseur, fut lancée avec tant de force, quelle traversa une tige de palmier de $45^{milli.}$ de diamètre.

Direction moyenne du vent. — Faute d'observations suivies de la vitesse du vent, on se contente, dans les diverses localités, de déterminer sa direction, et on note le nombre de fois que les vents de toutes les directions ont soufflé. Comme chaque vent fait passer par le lieu où se trouve l'observateur une masse donnée d'air, le résultat final peut être représenté par une masse gazeuse animée d'une certaine vitesse et dirigée suivant un certain sens; c'est ce que l'on nomme le vent moyen. On est obligé d'admettre que tous les vents ont soufflé avec la même intensité. Ainsi supposons qu'en un mois le vent du nord ait soufflé 70 fois, et le vent

du sud 30 fois, le résultat final est le même que si le vent du nord avait soufflé 70 — 30 = 40 fois. Mais lorsque les directions ne sont pas en opposition, et qu'elles font certains angles entre eux, on est obligé de chercher la résultante à l'aide d'un autre procédé.

Si l'on a trouvé, par exemple, que sur 1000 vents qui ont soufflé en un mois dans une localité, 100 étaient du nord, 650 du N.-N.-O., 230 du N.-O. et 20 de l'ouest, alors on suppose que ces nombres 100, 650, 230 et 20 représentent les forces moyennes des vents du N., N.-N.-O., N.-O. et O., et l'on cherche par la composition des forces quelle est, dans la rose des vents, la direction et la valeur de cette résultante. Si la résultante est une ligne N. 10° O., et égale à 700, cela indique que l'effet des différents vents est le même que si le vent avait soufflé 700 fois de N. 10° O.

Cette méthode pour calculer le vent moyen est due à Lambert. Voici les formules qui servent à calculer la direction et l'intensité :

$$\text{tang. A} = \frac{\text{E.} - \text{O.} + \frac{1}{2}\sqrt{2}(\text{N.-E.} + \text{S.-E.} - \text{N.-O.} - \text{S.-O.})}{\text{N.} - \text{S.} + \frac{1}{2}\sqrt{2}(\text{N.-E.} + \text{N.-O.} - \text{S.-E.} - \text{S.-O.})}$$

$$\text{V} = \frac{\text{E.-O.} + \frac{1}{2}\sqrt{2}(\text{N.-E.} + \text{S.-E.} - \text{N.-O.} - \text{S.-O.})}{\text{sin. A.}}$$

A est l'angle que fait la direction cherchée avec la méridienne, en partant du nord et passant par l'est; une fois cet angle trouvé, on en déduit V, qui est la force proportionnelle de ce vent. Les lettres E, O, N, etc..... désignent les nombres de fois que les vents de cette dénomination ont soufflé. Il est nécessaire, lors des calculs, d'examiner si tang. A correspond à l'angle A ou à 180° + A. La direction seule et la comparaison des nombres indiquent la valeur que l'on doit prendre.

M. Schouw a proposé de calculer le rapport numérique des vents d'est (N.-E., E., S.-E.); celui des vents du nord (N.-O., N., N.-E.); celui des vents de

l'ouest (N.-O., O., S.-O.), et celui des vents du sud (S.-E., S., S.-O.), et de chercher les nombres prédominants; soit les nombres suivants pour les différents vents :

N.	= 200	S.	= 50
N.-E.	= 300	S.-O.	= 50
E.	= 200	O.	= 25
S.-E.	= 100	N.-O.	= 75

on aura, d'après la méthode de Schouw, pour les vents :

du nord	= 200 + 300 + 75	= 575
de l'est	= 300 + 200 + 100	= 600
du sud	= 100 + 50 + 50	= 200
de l'ouest	= 50 + 25 + 75	= 150

Les vents prédominants auront donc été ceux du N.-E. Cette méthode est moins précise que la première, et si l'on connaissait la force du vent, la méthode de Lambert serait seule capable de donner exactement la résultante.

§ II. — *De la direction des vents dans les différents lieux du globe.*

Nous avons dit que toutes les fois qu'une partie quelconque de l'atmosphère éprouve une variation dans sa densité ou dans sa force élastique, soit par une variation de température, soit par suite d'une condensation de vapeur, il en résultait des mouvements dans l'air, c'est-à-dire des vents. Mais, quoique la direction de certains vents soit bien connue maintenant, comme on va le voir plus loin, et que des observations suivies aient conduit à reconnaître les déplacements des masses atmosphériques à la surface du sol suivant les diverses saisons, on ne connaît pas bien les causes prédominantes de ces déplacements, et l'explication des effets produits laisse encore beaucoup à désirer. Le parti le plus sage, dans ces circonstances, est donc d'indiquer les con-

séquences générales déduites des observations, puis de parler des hypothèses que l'on a proposées pour expliquer leur formation.

On peut classer les vents en quatre catégories, suivant les effets auxquels ils donnent naissance :

1° Vents alizés ou généraux.

2° Vents périodiques, moussons, brises de mer et de terre, etc.

3° Vents variables de nos contrées.

4° Vents accidentels.

Nous allons passer successivement en revue ces quatre classes de vents.

1° VENTS ALIZÉS. — On désigne sous ce nom les vents qui soufflent dans les régions équatoriales, au large des côtes, dans des directions à peu près constantes pendant le cours de l'année, de chaque côté de l'équateur, jusque vers 30° de latitude à peu près ; leur direction est du N.-E. au S.-O. dans l'hémisphère nord, et du S.-E. au N.-O. dans l'hémisphère sud ; c'est-à-dire que leur tendance générale est de l'est à l'ouest en sens inverse du mouvement de rotation de la terre, ou suivant le mouvement apparent du soleil. Il ne faut pas croire que les alizés soufflent dans la même direction, sur toute l'étendue des mers, entre ces parages ; ils sont influencés par les continents, et peuvent souffler en sens inverse de la direction indiquée plus haut ; ils ne se régularisent qu'à une certaine distance des côtes.

ALIZÉS DU GRAND OCÉAN. — Dans le grand Océan, l'alizé N.-E. souffle assez régulièrement à quelque distance des terres, entre l'équateur et le cercle tropical nord. Sa limite septentrionale s'avance vers le pôle nord, pendant l'été de notre hémisphère, et s'en éloigne pendant l'hiver. On peut admettre qu'il règne en moyenne de 2° vers 25° de latitude nord. L'alizé S.-E. de l'hémisphère sud souffle aussi régulièrement dans le grand Océan, mais ses limites ne sont pas aussi bien marquées ; elles ne s'écartent peut-être pas beaucoup des limites précédentes. La bande équatoriale qui

sépare les deux alizés de 2° de latitude nord à 2° sud est la région des calmes, où l'air n'est troublé que par des coups de vent nommés *tornados* par les Espagnols. Du reste, les orages et les pluies presque journalières s'opposent à l'existence de déplacements d'air réguliers.

Alizés de l'océan Atlantique. — Dans l'océan Atlantique, les régions où se trouvent les vents réguliers sont un peu déplacées; dans l'hémisphère nord, l'alizé N.-E. ne s'étend que depuis 8° jusqu'à 30° à peu près. La région des calmes s'étend de 8° nord à 3° de latitude nord; cette étendue varie aussi avec la saison; mais de 3° latitude nord à 30° sud, l'alizé S.-E. prédomine. M. de Humboldt attribue l'extension de l'alizé sud-est au delà de l'équateur dans l'hémisphère nord à la configuration du bassin de l'océan Atlantique. Du reste, la direction générale de la côte du S.-E. au N.-O. favorise singulièrement l'extension du vent S.-E. L'alizé du N.-E. s'avance davantage vers le nord, dans l'océan Atlantique, en été qu'en hiver; il se fait alors sentir jusque vers les côtes du Portugal.

Les régions dans lesquelles les deux vents se remplacent successivement sont séparées par une bande où des vents variables se succèdent avec des calmes ou des coups de vent. Il faut remarquer que dans les courants d'air, comme dans les courants d'eau, lorsqu'il existe simultanément deux courants en sens inverse, à une certaine distance, au milieu de ces courants, le fluide est tantôt calme, tantôt agité, tantôt il tourbillonne; c'est l'image des vents variables et des coups de vent.

2° Vents périodiques, moussons, brises de mer. — Nous venons de voir que, dans le grand Océan et dans l'océan Atlantique, les alizés s'étendent à peu près jusque vers les tropiques; mais, dans la mer des Indes, la présence des terres s'oppose à l'établissement de vents réguliers ou alizés. Tandis que dans l'hémisphère sud, à une certaine distance des terres, l'alizé S.-E. règne presque constamment, dans l'hémisphère nord de l'océan

Indien, il règne un vent S.-O., dirigé vers la péninsule de l'Indostan, le nord de l'Inde et la Chine, depuis avril jusqu'en octobre; et depuis octobre jusqu'en avril un vent contraire a lieu, et règne du N.-E. au S.-O. : ces vents sont les moussons de l'océan Indien. Ainsi, pendant l'été de notre hémisphère, lorsque le soleil a ses déclinaisons boréales, c'est la mousson S.-O. qui règne seule, tandis que dans notre hiver, lorsque le soleil a ses déclinaisons australes, c'est la mousson N.-E. qui prend naissance. Ces vents pénètrent dans l'intérieur des continents, où ils sont influencés par la forme des terres. Les chaînes de montagnes tendent en général à faire glisser les masses gazeuses parallèlement à leur direction.

On trouve dans bien des parages des vents périodiques qui alternent avec les saisons, et qui sont influencés par la conformation des côtes; ainsi, par exemple, au Brésil, il y a une mousson du printemps N.-E. et une mousson S.-O. d'automne. On peut voir, dans l'Atlas physique de M. Berghauss, la direction de ces vents périodiques dans différents lieux du globe; mais nulle part ils ne se manifestent d'une manière aussi régulière que dans l'océan Indien. Nous n'avons fait qu'indiquer leur direction générale, qui est toujours vers les continents au printemps et dans l'été, et en sens inverse dans l'hiver; mais ces vents se modifient singulièrement suivant les parages où ils soufflent, et surtout dans le grand archipel qui est à l'orient de la mer des Indes.

On retrouve aussi dans la Méditerranée des vents périodiques qui ont reçu le nom de vents étésiens, et qui sont les moussons de cette mer intérieure. Ces vents soufflent du nord; ils sont à leur maximum en été, et se font sentir sur toute cette mer ; ils se manifestent par le retard qu'éprouvent les navires qui reviennent d'Afrique en France. L'hiver, ou lorsque le soleil a ses déclinaisons australes, il règne en Égypte un vent du midi, mais plus fort que le vent du nord en été.

On voit donc qu'en général ces moussons, ces vents,

qui changent avec les saisons, sont dirigés vers les continents dans l'été, et en sens inverse dans l'hiver, c'est-à-dire vers les parties qui s'échauffent le plus lors de l'action des rayons solaires.

Les vents qui alternent avec les saisons ne sont pas les seuls vents périodiques que l'on observe ; il existe des vents connus sous le nom de brises de mer et brises de terre, qui se manifestent dans l'intervalle de 24 heures, et dont la périodicité est réglée par le mouvement diurne. Si l'air est calme le long d'une côte, vers les 8 ou 9 heures du matin, il s'élève un vent qui vient du côté de la mer, dont la direction est perpendiculaire à la côte, et qui est appelé vent de mer ; il augmente jusque vers 2 ou 3 heures à l'instant de la température maximum, puis diminue, pour cesser vers 5 heures ; alors il y a interruption jusqu'au coucher du soleil, où le vent de terre commence à se faire sentir dans une direction tout à fait opposée jusqu'au jour ; le lendemain les mêmes effets se reproduisent. Si l'air n'est pas calme et qu'il règne un vent ayant une certaine direction, alors les effets se composent et donnent lieu à une résultante.

Les brises de mer et de terre ne se font sentir qu'à peu de distance des côtes; car plus loin règnent les moussons; c'est à l'aide de la brise du matin ou du vent de mer que l'on entre dans les ports, et l'on en sort à l'aide de celle du soir ou du vent de terre.

Ces vents périodiques diurnes ont une origine analogue à celle des moussons; ils sont dirigés, comme on le voit, du côté des régions les plus échauffées, c'est-à-dire vers les terres pendant le jour, et en sens inverse pendant la nuit. Ils soufflent régulièrement dans les tropiques; mais, dans nos contrées, ils doivent suivre le cours des saisons, car la longueur des jours et des nuits règle leur durée. On en remarque encore quelques traces sur les côtes du Grœnland.

On observe aussi des déplacements d'air périodiques diurnes dans les pays de montagnes; ils consistent en une brise glissant le long de la montagne pendant la

nuit, et en une brise ascendante dans le jour. Ces déplacements sont extrêmement variés en raison même de la configuration et de l'orientation des montagnes. M. Fournet (*Annales de phys. et de chim.*, 1840, t. LXXIV, p. 337), qui a fait une étude approfondie de ces brises de montagnes, leur donne le nom de flux et reflux atmosphériques. Voici les principales conclusions auxquelles l'ont conduit ses observations.

Les aspérités du sol déterminent journellement un flux et un reflux atmosphériques, donnant naissance à des brises ou des vents ascendants et descendants, connus de temps immémorial dans certaines localités sous le nom de *thalwind*, *pontias*, *vesine*, *solore*, *vauderon*, *rebas*, vent du *Mont-Blanc*, *aloup de vent*. Ces courants d'air se développent au plus haut degré dans les concavités des vallées, mais sans leur être exclusivement propres, car ils se manifestent le long de toutes les rampes, et le courant des vallées n'est que la résultante des cascades latérales et partielles. Ce flux atmosphérique est rapide dans les gorges étroites et aboutissant par un court trajet à de hautes sommités. Il est plus tardif dans les bassins généraux, où le vent ascendant ne s'établit qu'à 10 heures du matin, et le vent descendant n'est régularisé que vers 9 heures du soir. L'heure de l'établissement de ces courants d'air varie avec les saisons, et aussi avec quelques circonstances accidentelles météorologiques.

La configuration des parties supérieures des vallées exerce encore une grande influence sur les vents suivant les heures et les saisons : aussi ils sont tantôt plus prononcés le jour que la nuit (vent de Maurienne), tantôt davantage la nuit que le jour (pontias, aloup de vent de Chessy). Quelquefois c'est l'hiver avec ses neiges qui est le plus favorable aux vents nocturnes (vent de Maurienne, pontias); d'autres fois c'est l'été pour les vents du jour (vent de Maurienne). Quelquefois les alternatives de chaud et de froid sont si brusques, que, par exemple, dans la vallée de Joux, on éprouve des varia-

tions qui ont été jusqu'à 20° en quelques heures; ainsi l'on a vu des faucheurs couper la glace le matin avec leur faux, tandis que, quelques heures après, le thermomètre marquait 38° au soleil; il est impossible que ces variations ne produisent pas de grands déplacements d'air.

En comparant les phénomènes des vents périodiques des montagnes à celui des brises de mer et de terre, qui se produisent périodiquement le long des côtes, on voit qu'à la même époque où les vents diurnes de mer poussent les vaisseaux dans les ports, l'air s'élève aussi vers les montagnes, et que l'inverse a lieu pendant la nuit. Ces vents tendent à transporter les corps susceptible de flotter dans l'air; c'est ainsi que, suivant les circonstances, les fumées et surtout les vapeurs vont se condenser durant le jour autour des hautes cimes (vallées d'Aoste, de la Maurienne, de l'Ossela, d'Aurasca, Col du Géant, Valais, etc...), ou bien sont ramenés pendant la nuit vers les concavités (Martigny, Chessy, Col du Géant, etc.); d'où il suit que l'air se dessèche pendant la nuit, et devient plus humide durant le jour sur les hauteurs, tandis que l'inverse a lieu dans les concavités (Genève, Col du Géant, etc.).

Les vents généraux supérieurs peuvent, dans certaines circonstances, altérer les vents périodiques des montagnes, les compliquer ou bien les anéantir. Il suit de là que les pronostics de beau temps, déduits de la régularité de l'allure des brises, sont souvent contredits par l'expérience; cependant, d'après M. Fournet, le renversement des courants d'air est suivi d'une pluie.

Les vents verticaux périodiques tendent à altérer les mesures des hauteurs par le baromètre, et montrent que ce n'est que sur des moyennes que l'on peut baser ces déterminations.

3° Vents variables. — Nous avons vu que sous les tropiques il existe des vents qui ont une tendance générale de l'est à l'ouest à une certaine distance des côtes, et que près de celles-ci, suivant les saisons, s'établissent des moussons qui, en se propageant dans

l'intérieur des terres, donnent lieu à une direction prédominante dans le déplacement des masses d'air de ces localités. Dans les latitudes moyennes ou plus élevées, en allant des tropiques aux pôles, il ne règne que des vents variables, alternant successivement, qui soufflent tantôt d'un point, tantôt d'un autre, pendant un temps plus ou moins long, mais qui ont cependant une tendance à une direction déterminée dans chaque localité, et qui varient suivant les saisons. Ce sujet est si vaste et si compliqué, qu'il est difficile de déduire quelques lois générales; nous allons tâcher néanmoins de résumer le plus brièvement possible les conséquences qui résultent des nombreuses observations faites jusqu'à ce jour.

Pour montrer comment alternent les vents et leur fréquence relative, nous rapportons, page suivante, un tableau extrait de M. Kæmtz (*Éléments de Météorologie*, p. 47), lequel indique les rapports des différents vents dans l'hémisphère nord. Dans l'impossibilité où on a été de mesurer la vitesse de ces vents, on est obligé d'admettre qu'ils ont soufflé avec une égale énergie; pour un même pays, on a supposé que 1000 vents avaient soufflé dans un temps donné, pendant un an, par exemple, et les nombres inscrits dans les colonnes N., N.-E., E., etc., indiquent combien chacun de ces vents a soufflé de fois; de sorte qu'en additionnant tous les nombres compris depuis la colonne N. jusqu'en N.-O. sur une même ligne horizontale, on retombe sur le nombre 1000. Les 10e et 11e colonnes indiquent la direction et la force du vent moyen d'après la méthode de Lambert que nous avons indiquée page 307.

On voit, à l'inspection de ce tableau, que les vents ne soufflent pas tous un même nombre de fois, et qu'ils indiquent une direction moyenne S.-O.; de sorte qu'à l'exception de la vitesse, l'effet total est le même que si le déplacement final de l'air avait été dans la direction S.-O., avec une intensité représentée par les nombres de la 11e colonne.

Si l'on fait attention aux nombres qui représentent

PAYS.	FRÉQUENCE RELATIVE DES VENTS.								DIRECTION du VENT MOYEN.	FORCE du VENT MOYEN.	RAPPORT des vents d'ouest aux VENTS D'EST.	RAPPORT des vents du sud aux VENTS DU NORD.
	N.	N.-E.	E.	S.-E.	S.	S.-O.	O.	N.-O.				
Angleterre.	82	111	99	81	111	225	171	120	S. 66° O.	198	1,77	1,33
France et Pays-Bas . . .	126	140	84	76	117	192	155	110	S. 88 O.	133	1,52	1,03
Allemagne.	84	98	119	87	97	185	198	131	S. 76 O.	177	1,69	1,18
Danemark.	65	98	100	129	92	198	161	156	S. 62 O.	170	1,54	1,31
Suède.	102	104	80	110	128	210	159	106	S. 50 O.	200	1,61	1,44
Russie et Hongrie. . . .	99	191	84	130	98	143	166	192	N. 87 O.	167	1,66	0,97
Amérique du Nord. . .	96	116	49	108	123	197	101	210	S. 86 O.	182	1,86	1,01

la fréquence relative des vents, on voit que non-seulement les vents du S.-O. prédominent, mais qu'il y a en outre un second maximum vers le N.-E., c'est-à-dire que les vents S.-O. et N.-E. sont ceux qui sont les plus fréquents dans nos contrées; il paraît même qu'en approchant des régions polaires, on trouve dans les mers des vents N.-E. prédominants, le vent du S.-O. diminuant à mesure que l'on s'éloigne des latitudes moyennes.

M. Fournet a divisé la France, sous le rapport des vents, en trois régions distinctes (*Annales de la Société d'agriculture de Lyon*) : 1° la région atlantique, qui comprend le centre, le N.-E., le N. et l'O. de la France, dans laquelle le vent prédominant est S.-O.; 2° le bassin du Rhône, où le vent du nord se fait sentir jusqu'à la latitude de Viviers; 3° la région méditerranéenne, dont la partie occidentale offre des vents d'O. à l'E., et la région orientale (Provence), où la direction moyenne est N.-O.

M. de Gasparin (*Météorologie agricole*, t. II, p. 233) a donné la direction du vent moyen pour un grand nombre de localités de l'Europe occidentale, et une carte où elles se trouvent tracées. Il résulte de ses calculs que le vent du S.-O. domine dans le nord de la France, en Angleterre et en Allemagne, et que la direction incline vers le N. dans le midi dans la France, de manière à donner des vents prédominants du N. en Espagne et en Italie.

Les saisons ont une influence sur la direction des vents dans nos contrées, car il doit nécessairement se passer ici un phénomène analogue à celui qui a lieu dans les régions tropicales lorsque les moussons se propagent dans les terres. Or, suivant les saisons, les continents et les mers des latitudes moyennes n'ayant pas les mêmes températures moyennes, le vent doit souffler du côté des mers dans l'été, et du sens inverse l'hiver, c'est-à-dire que, dans l'Europe occidentale, le vent doit avoir une tendance S.-O. l'hiver et N.-E. l'été.

Nous rapportons page suivante le tableau de la fréquence des vents à Paris, déduit d'observations faites pendant 20 ans. Nous avons réduit tout à la même unité que précédemment, c'est-à-dire à 1000 vents par mois, au lieu de laisser, comme dans l'original, le nombre de jours moyen où le vent a soufflé de telle ou telle direction.

En moyenne, pendant l'année, on voit bien les deux maxima correspondant aux vents N.-E. et S.-O.; mais dans les diverses saisons on peut remarquer que l'hiver le vent S.-O. domine, tandis que l'été la direction moyenne incline vers le N.

M. Schouw, en résumant les observations faites en différents points de l'Europe, a établi les conséquences suivantes : En hiver, la direction moyenne du vent est plus australe que dans le cours de l'année, et le maximum a lieu en janvier. Au printemps, les vents d'E. sont communs, sur certains points en mars, sur d'autres en avril; leur action se combine avec celle des vents du nord qui, dans beaucoup de localités, est à son maximum à cette époque. En été, la direction O. prédomine, et surtout en juillet; les vents du nord augmentant également, la direction moyenne tourne au N.-O. En automne, les vents du sud sont plus fréquents, et ceux d'ouest diminuent surtout en octobre; de sorte que la direction moyenne a une tendance au sud plus prononcée que dans les autres saisons.

En compulsant les registres météorologiques dans diverses localités, et calculant la direction moyenne du vent, on a cru remarquer un changement séculaire dans cette direction; ainsi à Paris on a eu :

	direction moyenne
de 1763 à 1772 (d'après Cotte)	229°
de 1768 à 1797 (id.)	317°
de 1806 à 1826 (Bouvard)	256°

Il semble donc que la direction moyenne avait d'abord marché vers le nord, puis ensuite était revenue vers le sud; dans d'autres localités on a aussi observé

MOYENNE DU NOMBRE MOYEN

DES VENTS QUI SOUFFLENT CHAQUE MOIS A PARIS,

d'après les observations de 1806 à 1826,
calculées par M. Bouvard. (*Mémoires de l'Académie des Sciences*, t. VII, p. 343.)

MOIS.	N.	N.-E.	E.	S.-E.	S.	S.-O.	O.	N.-O.	TOTAL des vents dans chaque mois
Janvier...	161	129	65	65	194	161	129	97	1000
Février...	91	91	61	91	212	182	182	91	»
Mars.....	161	161	32	65	129	161	194	97	»
Avril.....	167	167	67	67	167	133	133	100	»
Mai......	129	97	97	65	161	194	194	65	»
Juin.....	167	133	67	33	100	167	233	100	»
Juillet....	138	69	34	34	138	207	276	103	»
Août.....	103	69	69	34	103	241	276	103	»
Septembre	133	100	67	67	167	200	167	100	»
Octobre...	97	65	65	97	258	194	161	65	»
Novembre.	65	97	65	65	194	194	194	129	»
Décembre.	69	138	69	69	241	172	172	69	»
Année entière... (Moyenne de 20 années consécutives.)	123	110	63	63	173	183	192	93	1000

des effets analogues. Il est nécessaire d'une longue suite d'observations à cet égard, pour établir des résultats sur lesquels on puisse compter.

4° *Vents accidentels.*—On peut ranger dans cette catégorie les grands déplacements d'air qui sont dus soit à des condensations subites de vapeurs, soit à toute autre cause accidentelle: tels sont les orages, les ouragans. Les premiers ne sont fréquents que dans les régions tropicales, comme nous le verrons dans un paragraphe à part, en traitant de l'électricité atmosphérique. Quant aux ouragans, dans lesquels l'air peut acquérir une vitesse qui va jusqu'à 45 mètres à la seconde, ils sont heureusement assez rares, car ils causent des désastres effroyables. Nous citerons, par exemple, l'ouragan du 13 juillet 1788 (*Mémoires de l'Académie des sciences*, 1790), qui ravagea la France et la Hollande. C'est un des plus effrayants qui se soient manifestés dans nos climats; il s'est étendu en deux bandes, l'une de 4 lieues, l'autre de 2 lieues $\frac{1}{4}$ de largeur moyenne, et d'une longueur de près de 200 lieues; la vitesse moyenne de l'air était de 20 mètres à la seconde. L'ouragan qui, le 29 novembre 1836, passa sur Londres, était animé d'une vitesse de 36 mètres à la seconde.

Vents à diverses hauteurs.—Non-seulement il existe à la surface du globe des déplacements de masses gazeuses, mais il y a aussi des courants d'air supérieurs qui nous sont rendus sensibles par la marche en sens inverse des nuages, et par les courants dans lesquels se sont trouvés les ballons lors d'ascensions aérostatiques, et qui ont poussé les voyageurs dans une tout autre direction que celle du vent de terre.

M. Valz a fait en 1822 des expériences qui montrent bien l'existence simultanée de ces courants différents à diverses hauteurs. Il a déterminé la route des ballons, par le même procédé dont on aurait fait usage pour suivre la marche d'une planète. Dans une expérience, le vent de terre était ouest; il régnait jusqu'à 1200 mètres d'élévation; là il y avait un vent du nord ayant à peu près la

même vitesse. Dans une autre expérience, le vent de terre étant S.-O., il avait une vitesse de $7^m,5$ par seconde, et régnait jusqu'à 1270^m; de là, jusqu'à 2400^m, le vent était de l'E., puis du N.-E. jusqu'à 2700^m. En cet endroit, ces vents étaient d'E. jusqu'à 2950 mètres, point de la plus haute élévation du ballon. Au-dessus de 700 mètres, la vitesse du vent avait été à peu près égale à $3^m,3$ par seconde; en descendant, le vent du S.-O., qui était passé au S.-E., avait augmenté, et à 700^m sa vitesse était de $16^m,5$ par seconde; plus près de terre, elle était de 9^m par seconde. Il est à regretter que l'on n'ait pas plus de données sur ce sujet.

§ III. — *Propriétés physiques des vents.*

Du mode de transmission. — Pour compléter ce qui concerne la description des vents, il s'agit d'examiner leur mode de transmission. Se transmettent-ils dans les contrées vers lesquelles ils soufflent ou dans les contrées situées en arrière?

Quand on fait agir un soufflet, il se produit deux vents, l'un par aspiration, l'autre par impulsion; l'air qui sort du tuyau pousse l'air par impulsion vers les points où il souffle; l'air qui entre dans le soufflet agit par aspiration, et transmet son mouvement en sens inverse de sa direction. Il doit donc y avoir des vents par aspiration et par impulsion, et les divers effets dépendent des causes qui donnent lieu à ces déplacements gazeux.

Depuis Franklin, on admet en général que les vents se font plutôt sentir par aspiration que par impulsion. Un vent du N.-E., qui empêcha Franklin d'observer une éclipse de lune, se fit d'abord sentir à Philadelphie à 7 heures du soir, puis ensuite à Boston à 11 heures, quoique Boston fût au N.-E. de cette ville. Cet ouragan s'est donc propagé entre ces deux villes par aspiration.

Un vent violent du S.-O. qui ravagea, le 12 juin 1809,

les États-Unis, souffla d'abord à Albany, puis à New-York, qui est plus au sud. C'était encore un vent par aspiration.

L'ouragan S.-O. du 29 novembre 1836, qui passa à 10 heures du matin sur Londres, arriva à 1 heure du matin à la Haye; il se fit sentir à 1 heure et demie à Amsterdam, à Hambourg à 6 heures, à Stettin à 9 heures et demie du soir. Sa vitesse était donc de 36^m par seconde. C'était un vent par impulsion qui se propageait dans les contrées vers lesquelles il soufflait.

Lorsque le vent souffle, son intensité n'est pas constante pendant toute sa durée, ou du moins elle semble n'être constante qu'en pleine mer, lors de l'établissement des vents réguliers. En dehors de cette circonstance, il souffle par rafales, avec des intermittences de calme, et plus souvent avec des changements d'intensité que de Saussure a évaluée à la moitié ou aux deux tiers de l'intensité ordinaire. Ce sont des espèces d'ondes aériennes qui se transmettent dans l'atmosphère comme les vagues à la surface de l'eau, et qui proviennent, probablement, des obstacles que l'air en mouvement est obligé de franchir.

De la température par différents vents. — Le caractère de chaque vent n'est pas le même sur toute la surface du globe. Lorsque les masses d'air passent d'un pays dans un autre, elles transportent dans ce dernier une partie des propriétés physiques qu'elles ont acquises dans les localités qu'elles ont traversées. Si elles ont glissé à la surface de la mer, les vents sont humides; si elles ont traversé une grande étendue de continent, ils sont secs. Ainsi les vents doivent se modifier dans chaque lieu suivant les espaces qu'ils ont parcourus avant d'y arriver. Nous donnons pour exemple la température moyenne à Paris, à 3 heures de l'après-midi, par les différents vents.

VENTS.	ANNÉE ENTIÈRE.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.
N.	15°,2	3°,6	13°,7	27°,2	14°,8
N.-E.	14,2	1,2	19,4	28,1	14,3
E.	23,1	2,5	17	30,0	16,1
S.-E.	19,1	5,7	26	32,8	19,1
S.	19,3	8,3	20,3	29,5	19,4
S.-O.	18,6	10,8	18,2	26,6	15,6
O.	17,0	8,8	16,8	26,0	16,8
N.-O.	15,5	6,0	14,6	25,8	15,7
Moyenne.	17,85	5,76	17,10	28,25	16,98

On observe que le caractère des vents change avec les saisons, parce que les espaces qu'ils parcourent présentent aussi des circonstances différentes. Ainsi l'hiver, le vent d'est qui vient de l'intérieur du continent est froid, tandis que l'été il est chaud.

Dans certaines circonstances, il existe des vents périodiques, ou du moins provenant de la configuration des localités, qui ont été observés depuis un temps immémorial. Ainsi, au sud des Alpes, il existe des vents du nord très-froids, qui proviennent de ces montagnes, et qui prennent les noms de bise ou de bora, suivant les localités où ils font sentir leur influence. Dans la vallée du Rhône, il règne aussi un vent du S.-E., que l'on a nommé le mistral, qui est très-froid et très-redoutable.

Le simoun (samoun ou semoun), ou vent brûlant du désert, est appelé chamsin en Égypte (cinquante), parce qu'il souffle pendant cinquante jours, de la fin d'avril en juin, c'est-à-dire 25 jours avant l'équinoxe de printemps et 25 jours après, et harmatan dans la partie occidentale du Sahara. Il vient des parties centrales du désert,

qui, étant échauffé fortement, fait monter quelquefois le thermomètre à 50° à l'ombre. Dès l'instant que le vent commence, il emporte du sable et de la poussière qui obscurcissent l'atmosphère; le soleil perd son éclat, la peau se sèche, la respiration s'accélère, et la soif devient ardente; l'eau même s'évapore dans les outres. Les Arabes se couvrent alors la figure, afin que le sable n'entre pas dans la bouche et les yeux. En Perse, les habitants s'enduisent le corps de boue humide, et les Africains de graisse, afin de parer aux effets d'une évaporation trop rapide.

Nous citerons aussi le sirocco d'Italie, vent du S.-E., qui règne en Afrique, dans les régions voisines de la Méditerranée, ainsi qu'à Malte et en Sicile. Ce vent est tellement chaud qu'il tue quelquefois en une demi-heure les animaux; quand il souffle, les habitants restent chez eux, les portes et les fenêtres calfeutrées. On en ressent aussi les effets à Naples et dans plusieurs parties de l'Italie, mais moins fortement qu'à Palerme.

Nous mentionnerons les noms de quelques vents adoptés par les Italiens et les Provençaux, et qui sont cités dans les ouvrages de météorologie :

Tramontane (trans montes), vent du	nord.
Levante	E.
Ponente	O.
Grego.	N.-O.
Lebecho (Libye).	S.-O.

Les déserts de l'Afrique et de l'Asie sont les endroits où les vents chauds se montrent avec le plus de violence. Cependant d'autres contrées, comme les plaines de l'Orénoque, etc., donnent lieu à des vents analogues.

Lorsque les vents violents du désert se font sentir, ils transportent le sable léger qui s'accumule en certains endroits sous forme de petits monticules, d'où ils reçoivent bientôt une nouvelle impulsion; ils forment ainsi des espèces de petites collines mouvantes.

Sur les bords de la mer, il se passe un phénomène

analogue, et le sable, accumulé par l'action des vagues, peut recevoir une force d'impulsion du vent et s'avancer dans les terres; ces monticules portent le nom de dunes. On peut les observer sur les bords de l'Océan et particulièrement sur les côtes de France; elles sont presque constamment poussées vers l'intérieur des terres, par les vents qui agissent d'une manière incessante. Sur les côtes de Gascogne, leur marche est rapide, et tout ce qui se trouve sur leur passage est renversé. Bremontier, qui s'est beaucoup occupé des moyens de les fixer au sol (Voyez page 195), par des semis d'arbres verts, leur accorde une vitesse à 24 mètres par an. Il est parti de là pour prédire l'époque où Bordeaux serait enseveli sous les sables.

SECTION III.

DES VARIATIONS BAROMÉTRIQUES.

La hauteur de la colonne mercurielle, dans le baromètre, indiquant le poids de la colonne atmosphérique située au-dessus de l'appareil, les déplacements qui ont lieu dans l'atmosphère ne peuvent pas se manifester sans que la pression varie dans les différentes circonstances. Il est nécessaire d'étudier ces variations avant d'indiquer les diverses hypothèses qui ont été proposées pour rendre compte de l'alternative des vents qui soufflent à la surface de la terre.

§ I. — *Variations diurnes barométriques.*

Heures tropiques. — Au milieu des oscillations continuelles de la colonne barométrique, on observe des mouvements réguliers qui indiquent que le mercure baisse continuellement à certaines heures, pour monter ensuite à d'autres heures de la journée, de manière qu'entre deux midi consécutifs, dans l'intervalle d'une journée, il y a deux maxima et deux minima d'élévation. Ces oscillations régulières sont faciles à observer vers l'équateur, où elles sont régulières et d'une plus grande amplitude que sous les latitudes plus élevées;

mais, dans nos climats et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur, il faut un plus grand nombre d'observations horaires, pour mettre en évidence ce qu'il y a de régulier dans ce phénomène.

Il paraît que Beale, en 1666, soupçonna l'existence des variations diurnes. Depuis, on s'en est beaucoup occupé; mais M. de Humboldt est le premier qui ait fait des observations exactes à ce sujet; il a été imité par les météorologistes actuels.

Les heures des maxima et des minima que l'on a nommées heures tropiques, et qui sont déduites d'un grand nombre de moyennes annuelles, semblent à peu près les mêmes dans tous les pays, quelle que soit leur latitude. Les différences observées dépendent peut-être de ce que les observations ne sont pas assez nombreuses pour faire disparaître l'influence des anomalies.

M. Kæmtz a donné pour moyennes générales des heures tropiques dans notre hémisphère :

Minimum du soir.......	$4^h\ 5'$	de l'après-midi.
Maximum du soir.......	$10^h 11'$	Id.
Minimum du matin......	$3^h 45'$	du matin.
Maximum du matin......	$9^h 37'$	Id.

Ainsi, depuis midi, le baromètre baisse jusqu'à 3 ou 5 heures du soir, suivant les localités, ou en moyenne jusque vers 4 heures ; à cette heure, il a atteint un minimum; puis il remonte et atteint son maximum vers 10 heures du soir, ou plutôt entre 9 heures et 11 heures. Enfin, il baisse de nouveau, et atteint un second minimum vers 4 heures du matin, et un second maximum vers 10 heures.

On voit, d'après cela, que ce mouvement régulier est invariablement lié au mouvement diurne.

Si en moyenne annuellement les heures tropiques sont les mêmes à toutes les latitudes, dans un même lieu elles varient avec la saison, c'est-à-dire que les heures des maxima ne sont pas les mêmes dans les différents mois. Il résulte, d'observations faites à Halle par

M. Kæmtz, qu'en hiver le baromètre atteint vers 3 heures le minimum, et en été il baisse jusqu'à 5 heures ; c'est-à-dire qu'en hiver les moments tropiques arrivent plus tôt le soir et plus tard le matin ; ils sont donc plus rapprochés de midi d'environ 2 heures.

Amplitude de la variation diurne ou oscillation diurne. — Le baromètre montant et descendant dans le cours d'une journée, cherchons à évaluer l'amplitude de la variation diurne. Puisqu'il existe deux maxima et deux minima, lorsqu'on ne prend que les différences entre les maxima et les minima consécutifs, on a les oscillations du baromètre par période ; il y a donc quatre périodes ou quatre différences, deux périodes de jour et deux périodes de nuit. La période du matin est plus forte que celle du soir, et éprouve des variations considérables. Ainsi, d'après M. Bouvard, à Paris, de 1806 à 1826, en moyenne, l'amplitude de la période du matin est $0^{mill.},756$, et celle du soir $0^{mill.},373$, la hauteur moyenne du baromètre étant $756^{mill.}$

Les avis ont été partagés sur le mode de comparaison des variations diurnes moyennes. M. de Humboldt n'a pris que la différence des extrêmes du matin et du soir ; M. Kæmtz préfère prendre la différence entre les moyennes des deux maxima et des deux minima ; il a appelé cette variation moyenne *oscillation diurne*.

Quand on observe tous les jours et que l'on prend la moyenne mensuelle, on reconnaît alors que, dans les divers mois, sa valeur change ; en hiver elle est à son minimum, et en été à son maximum.

Non-seulement la saison fait varier l'amplitude dans un même lieu, mais encore la hauteur de celui-ci au-dessus du niveau de la mer a une influence sur l'oscillation diurne : on remarque que cette oscillation diminue à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, et qu'à une certaine distance elle doit être nulle ; de sorte que pour avoir l'amplitude de l'oscillation au bord de la mer, il faut réduire l'oscillation trouvée par expérience, à l'aide de la diminution de l'amplitude, à mesure que l'on s'élève

dans l'atmosphère. On a donné pour cela des formules empiriques, qui peuvent souvent être en défaut, car non-seulement l'heure des maxima et des minima peut changer par des causes accidentelles, mais encore les intensités des maxima et des minima peuvent faire prédominer l'influence de causes locales sur l'amplitude diurne.

M. Kæmtz admet la formule suivante, déduite d'un grand nombre de moyennes, pour calculer la variation diurne au bord de la mer, celle qui a eu lieu à une hauteur déterminée au-dessus de la mer donnant H pour pression barométrique :

$$D = d + 0{,}003413\ (760^{\text{mill.}} - H),$$

D étant la variation barométrique au niveau de la mer, et d la variation dans le lieu élevé où l'on observe.

M. Bravais a proposé un autre mode de détermination de la mesure de l'amplitude moyenne (*Institut*, 1842, page 309), pour calculer l'extinction de l'amplitude moyenne, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. La formule qu'il donne est la suivante :

$$D = d + 0{,}0007\ (760^{\text{mill.}} - H);$$

d, ou l'amplitude moyenne, représentant la racine carrée de la différence de la moyenne des carrés des différences des lectures horaires barométriques variables, et de la lecture moyenne barométrique qui est constante.

L'amplitude des variations diurnes change avec la latitude, et diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. On ne sait pas si cette amplitude est la même dans l'intérieur des continents et sur le bord de la mer, et quelles sont les variations dues aux causes accidentelles; dans nos climats, le voisinage de la mer semble se manifester par une diminution dans l'amplitude de l'oscillation diurne. D'après des séries d'observations, M. Kæmtz (*Éléments de météorologie*, page 260) a conclu, en moyenne, pour les latitudes suivantes, l'amplitude des oscillations du baromètre.

HAUTEUR ET OSCILLATION DIURNE MOYENNE DU BAROMÈTRE A DIFFÉRENTES LATITUDES.

LIEUX.	LATITUDE.	HAUTEUR MOYENNE.	OSCILLATION MOY. DIURNE observée.	OSCILLATION MOY. DIURNE calculée, réduite au niveau de la mer
		mm	mm	mm
Lima	12° 3' S.	741,72	2,71	2,78
Caracas	10 31 N.	681,94	2,17	2,44
Payta	5 6 S.	757,96	2,08	2,08
Santa-Fé de Bogota	4 36 N.	759,90	2,01	2,69
Ibagué	4 28	658,70	1,92	2,27
Popayan	2 26	618,10	1,92	2,41
La Guayra	10 36	759,31	1,89	1,90
Calcutta	22 35	758,86	1,84	1,85
Callao	12 3 S.	759,76	1,84	1,84
Cumana	10 28 N.	756,15	1,78	1,80
Grand Océan	0 0	»	1,71	1,71
Rio-Janeiro	22 54 S.	764,95	1,70	1,70
Chittledroog	14 11 N.	695,02	1,65	1,80
Taiti	17 29 S.	761,34	1,64	1,64
Mexico	19 26 N	583,13	1,59	2,20
Grand Océan	16 0 S.	»	1,55	1,55
Sierra-Leone	8 30 N.	754,34	1,55	1,57
Le Caire	30 2	757,28	1,54	1,55
Quito	0 13 S.	553,81	1,48	2,19
Grand Océan	18 0 N.	»	1,45	1,45
Antisana	0 33	470,34	1,26	2,25
Rome	41 54	531,24	0,98	1,00
Bâle	47 34	738,79	0,84	0,92
Viviers	44 29	755,47	0,84	0,86
Bruxelles	50 50	757,06	0,80	0,81
Clermont	45 27	727,96	0,77	0,82
Milan	45 28	752,09	0,75	0,78
Coire	46 51	711,04	0,71	0,88
Francfort-sur-Mein	50 8	752,47	0,71	0,74
Arnstadt	50 50	734,40	0,67	0,76
Heidelberg	49 25	756,84	0,65	0,63
Mannheim	49 29	750,74	0,58	0,61
Paris	48 50	756,61	0,55	0,56
Iéna	50 56	749,16	0,54	0,58
Christiania	59 55	757,96	0,52	0,52
Prague	50 5	743,97	0,51	0,57
Padoue	45 24	756,84	0,48	0,51
Halle	51 29	753,45	0,47	0,50
Dresde	51 7	744,42	0,47	0,53
Gotha	50 56	730,89	0,45	0,55
Zittau	50 52	739,91	0;45	0,52
Munster	51 58	754,80	0,43	0,45
Wetzlar	50 32	743,75	0,39	0,45
Apenrade	55 3	758,86	0,36	0,37
Berlin	52 33	758,63	0,34	0,35
Port-Famine	53 38 S.	750,51	0,34	0,34
Altenberg	50 45 N.	695,69	0,33	0,55
Freyberg	50 55	726,15	0,31	0,42
Cracovie	50 4	742,38	0,30	0,36
Dantzig	54 21	759,31	0,29	0,30
Abo	60 27	759,55	0,26	0,26
Édimbourg	55 55	746,90	0,21	0,26
Kœnigsberg	54 42	760,88	0,19	0,19
Pétersbourg	59 56	750,31	0,13	0,14
Kasan	55 48	758,19	0,12	0,13

On voit que, vers 60° de latitude, l'amplitude s'éteint graduellement.

Au delà du cercle polaire, les variations ont encore une certaine valeur, et il est probable qu'elles ne cessent qu'au pôle. A Bossecop, d'après les observations de la station française, sous le 70e degré de latitude, 40 jours avant et 40 jours après le solstice d'hiver, la variation barométrique a été à peine égale à 0milli.,3.

§ 2. — *Variations mensuelles et annuelles.*

Si l'on fait abstraction de la variation diurne, on peut avoir la hauteur moyenne du baromètre: quelquefois l'on déduit cette hauteur de la hauteur barométrique à midi; mais il vaut mieux la prendre par une série d'observations faites à 6h du matin, 2h et 10h du soir, ou mieux à 9h du matin, 3h de l'après-midi et 9h du soir. On voit alors que dans les diverses saisons la hauteur, dans un même pays, ne reste pas constante. Nous donnons pour exemple les hauteurs barométriques faites pendant 10 années, de 1806 à 1826, par M. Bouvard à Paris (*Mémoires de l'Institut*, t. VII, page 312). Le baromètre était observé à Paris, à 9h du matin, midi, 3h, et 9h du soir. Nous ne donnons que les déterminations de 9h, 3h, et 9h du soir, car ce sont elles qui servent à calculer l'amplitude de l'oscillation diurne.

On reconnaît, à l'inspection du tableau de la page suivante, comme dans d'autres localités on l'a aussi observé, que la moyenne mensuelle est plus forte en été qu'en hiver. Il y a du reste deux maxima et deux minima bien distincts, c'est-à-dire une double période; en sorte que, depuis l'hiver, la pression diminue jusqu'à l'équinoxe de printemps ; elle augmente en été sans atteindre la moyenne hibernale; puis ensuite, en automne, on retrouve un second minimum, et enfin la pression augmente jusqu'en hiver.

Ce fait, que les pressions sont moindres en été qu'en hiver, est une conséquence de l'échauffement des masses

DE 1816 A 1826	HAUTEUR MOYENNE DU BAROMÈTRE			HAUTEUR moyenne du baromètre.	AMPLITUDE de l'oscillation diurne.	
	à 9 h. du m.	à 3 h. du s.	à 9 h. du s.		Période du m.	Période du s.
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Janvier....	758,106	757,429	757,690	757,742	0,677	0,261
Février....	758,165	757,236	757,557	757,653	0,929	0,321
Mars......	756,203	755,406	755,823	755,811	0,797	0,500
Avril......	755,253	754,243	754,780	754,759	1,010	0,537
Mai........	755,253	754,440	754,786	754,826	0,813	0,346
Juin.......	757,307	756,600	756,875	756,927	0,707	0,275
Juillet.....	756,554	755,817	756,140	756,170	0,737	0,323
Août.......	756,807	755,953	756,271	756,310	0,854	0,318
Septembre.	756,773	755,972	756,432	756,392	0,801	0,460
Octobre...	754,772	754,021	754,522	754,438	0,751	0,501
Novembre..	755,822	755,277	755,660	755,653	0,545	0,383
Décembre..	755,152	754,703	754,950	754,935	0,449	0,247
Année.....	756,347	755,591	755,950	755,963	0,756	0,373

d'air dans les diverses localités; on est donc porté à supposer que l'air s'écoule vers les régions plus froides. Aux équinoxes, lorsque la température est à peu près égale à la moyenne annuelle, on a la pression barométrique moyenne de l'année. Le soleil s'avance-t-il vers l'hémisphère boréal, celui-ci s'échauffe plus, l'autre hémisphère se refroidit, et la pression augmente dans ce dernier, puis diminue dans le premier, c'est-à-dire, en d'autres termes, que le baromètre se tient plus bas dans les pays où règne l'été, et plus haut dans ceux ou règne l'hiver. Les observations ne sont pas assez nombreuses pour permettre de savoir si, à latitude égale, les variations sont plus fortes dans les continents que sur les mers; mais il est possible qu'il en soit ainsi.

La hauteur de la colonne barométrique indique la somme des poids des colonnes d'air et de vapeur qui se trouvent au-dessus du lieu de l'observation. Mais si l'on voulait avoir la valeur de la pression de l'air sec, il faudrait retrancher la tension de la vapeur d'eau de la moyenne barométrique, ce qui supposerait connues les tensions de la vapeur d'eau à diverses hauteurs dans l'atmosphère; dans l'incertitude où l'on est à ce sujet, on ne peut que faire des conjectures. En ayant égard seulement à la tension de la vapeur à la surface de la terre, on obtient des nombres, pour les moyennes mensuelles des pressions de l'air sec, qui montrent un maximum en hiver et un minimum en été, à l'époque des grandes chaleurs; de plus, la différence entre les deux extrêmes, maximum et minimum, diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. Ainsi, de même que pour l'amplitude des variations diurnes, l'amplitude de ces variations mensuelles est plus considérable vers l'équateur, et diminue rapidement dans les latitudes élevées.

§ III.— *Hauteur moyenne du baromètre au niveau de la mer.*

Si l'on prend la moyenne des hauteurs barométriques annuelles au niveau de la mer, dans les différents lieux du globe, on a, année moyenne, le poids de la colonne atmosphérique qui repose sur ces diverses régions. On voit, en calculant cette hauteur, que l'on peut en déduire les conséquences suivantes (M. Schouw, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. II, page 573):

Sous l'équateur	la hauteur moyenne est un minimum; elle a à peu près..	758^{mill}
A 10° de latitude, la pression augmente.		
Vers 30 ou 40°, elle atteint son maximum à..........................		762 ou 764 »
Dans les latitudes plus élevées, elle diminue.		
Vers 50° de latitude, elle n'est plus que de...		760 »
Et plus au nord.........................		756 »

Vers 75° de latitude, dans l'île Melville, il paraîtrait que la pression augmente de nouveau et serait 758$^{mill.}$. Mais ces déterminations sont moins sûres que les précédentes.

M. Kæmtz, en remarquant que la pression barométrique se compose de la pression de l'air et de celle de la vapeur, retranche la tension de la vapeur pour avoir celle de l'air sec ; à l'équateur, il admet 25$^{mill.}$ pour la tension de la vapeur d'eau ; à 35° de latitude, 14$^{mill.}$6, et à 70°, 4$^{mill.}$5 ; en soustrayant ces quantités des valeurs au bord de la mer, on a pour l'air sec :

Vers l'équateur................	733$^{mill.}$
Vers 35°......................	748
70°......................	752

La pression de l'air sec augmenterait donc jusqu'aux pôles.

Mais, en moyenne totale, on peut admettre au bord de la mer 761$^{mill.}$ pour la pression atmosphérique de l'air humide au bord de la mer.

§ IV. — *Oscillations irrégulières du baromètre. Lignes isobarométriques.*

Lorsqu'on observe le baromètre sous l'équateur ou dans les régions tropicales, on trouve que sa marche est très-régulière. A mesure que l'on approche des latitudes élevées, on ne retrouve plus les périodes diurnes qu'à travers un grand nombre de moyennes ; on s'aperçoit que le baromètre a des oscillations diurnes irrégulières, qui dépendent des saisons, de la position géographique et des vents.

Quand on compulse un très-grand nombre d'observations, on finit par trouver qu'il y a un changement moyen entre deux midi consécutifs, qui oscille autour d'un même nombre. Ce changement, qui est, en moyenne, annuellement de 0$^{mill.}$,483 à Santa-Fé de Bogota, de 2$^{mill.}$,9 à Milan, peut aller jusqu'à 5$^{mill.}$,401, comme à Ey-A-Fiord (Islande). En été, il y a une moins grande différence entre les pressions, et, par la même raison,

les oscillations accidentelles sont moins fortes vers l'équateur; cela provient de ce que les variations de température sont moins étendues.

Si, dans une longue série d'observations répétées plusieurs fois chaque jour, on prend, dans un mois, la pression maximum et la pression minimum, on a, par la différence, l'oscillation mensuelle moyenne; si cette série embrasse plusieurs années, on finit par trouver des nombres peu différents l'un de l'autre. Ces nombres montrent bien l'influence des saisons, car la variation barométrique est beaucoup plus forte en hiver qu'en été; mais en prenant la moyenne des deux, on a l'oscillation moyenne mensuelle pendant le cours de l'année. On remarque alors que cette oscillation augmente à mesure que la latitude augmente, mais sans toutefois varier de la même manière sous tous les méridiens. Elle est à peine 3$^{\text{mill.}}$ à l'équateur, et peut aller jusqu'à 30$^{\text{mill.}}$ vers le 60° de latitude. Le tableau représenté pages 335 et 336 est extrait de la Météorologie de M. Kæmtz.

Si l'on réunit les points du globe qui ont la même oscillation mensuelle moyenne, on forme les lignes isobarométriques, de même que l'on a construit les lignes isothermes par la réunion des points où la température moyenne est la même. Ces lignes représentent les oscillations irrégulières du baromètre, et sont importantes à considérer, car ce ne sera qu'à la suite d'études approfondies sur tous les changements de l'atmosphère que l'on pourra lier entre eux les phénomènes de déplacement des masses gazeuses à la surface du sol et dans les diverses saisons. (Voyez, pour leur description, les *Éléments de météorologie* de Kæmtz, page 300 et suivantes, et pour le tracé l'*Atlas physique* de Berghaus, pour 1838.)

En général, les oscillations du baromètre sont sensiblement semblables, et donnent des courbes parallèles lorsqu'on les étudie sur des points voisins; mais, à de grandes distances, le baromètre peut monter dans un lieu et baisser dans un autre, et, ordinairement, une

AMPLITUDE MOYENNE DES OSCILLATIONS

BAROMÉTRIQUES

Pendant l'année, l'hiver et l'été, dans différents pays.

VILLES.	LATITUDE.	LONGITUDE.	ANNÉE.	HIVER.	ÉTÉ.
			mm	mm	mm
Batavia	6° 12′ S.	104° 33′ 36″	2,98	2,80	2,71
Tivoli (St.-Domingue)	18 35 N.	72 20 24	4,11	4,96	3,32
Seringapatnam	12 45	74 30 36	5,53	5,12	5,03
Havane	23 9	84 43 24	6,38	9,63	3,84
Calcutta	22 34	86 8 36	8,28	6,81	9,05
Ténériffe	28 20	18 36 24	8,48	12,71	4,51
Ile de France	20 9 S	55 9 36	8,62	6,99	7,90
Alep	36 11 N.	34 29 36	9,09	14,21	5,57
Le Caire	30 2	28 58 36	9,25	12,93	4,74
Funchal (Madère)	22 37	19 16 24	10,42	13,99	6,23
Bagdad	33 20	42 4 36	10,45	13,83	8,60
Cap de Bonne-Espérance	33 55 S.	16 3 36	12,45	15,07	9,79
New-Harmony (Indiana)	38 11 N.	90 15 24	16,40	22,90	8,89
Péking	39 45	114 7 36	16,65	16,92	11,57
Paramatta (N.S. Wales)	33 49 S.	148 40 36	16,92	17,37	15,72
Lausanne	46 31 N.	4 25 36	17,08	21,20	12,11
Bermude	32 15	62 20 24	17,10	20,46	15,77
Rome	41 53	10 7 36	17,15	22,92	9,93
Marseille	43 18	3 1 36	17,69	23,08	17,44
Saint-Gothard	46 0	6 14 36	17,98	23,76	13,08
Montpellier	43 36	1 32 36	18,02	23,08	12,86
Turin	45 4	5 14 36	18,09	22,58	12,25
Mantoue	45 10	8 27 36	18,14	24,59	14,14
Pyschminsk	57 0	76 29 36	18,99	1,43	12,79
Dijon	47 19	2 41 36	19,13	25,49	11,44
Milan	45 28	6 51 36	19,24	24,90	12,36
Bude	47 30	16 42 36	19,92	26,78	13,08
Augsbourg	48 22	8 33 36	20,33	25,33	14,19
Vienne	48 13	14 2 36	20,53	26,78	13,02
Mulhouse	47 49	4 49 36	20,64	27,75	13,02
Munich	48 8	8 13 36	20,73	27,25	13,94
Metz	49 7	3 49 36	20,80	26,23	13,99
Prague	50 5	12 4 36	21,54	27,32	14,66
Ratisbonne	49 1		21,66	27,63	14,98
Bordeaux	44 50	2 54 24	21,68	29,33	14,05
Kamyschin	50 5	43 3 36	21,86	27,23	16,20
Strasbourg	48 35	5 24 36	21,93	28,36	14,48
Nantes	47 13	3 53 24	22,92	28,81	15,34
Arnstadt	50 50	8 36 36	23,01	27,82	16,33
Breslau	51 7	14 41 36	23,14	29,17	15,27
La Rochelle	46 9	3 30 24	23,17	31,74	15,79
Paris	48 50	00 00 00	23,66	30,45	17,17
Mannheim	48 29	6 7 36	23,66	31,06	16,45
Moscou	55 46	35 12 36	24,05	31,31	15,59

VILLES.	LATITUDE.	LONGITUDE.	ANNÉE.	HIVER	ÉTÉ.
			mm	mm	mm
Sitcha	57° 3' N.	140°20'24"	24,50	25,83	17,19
Sagan	51 42	13 1 36	24,57	31,42	16,58
Fort Churchill	58 47	96 24 24	22,76	30,72	18,79
Berlin	52 31	11 1 36	25,24	33,07	17,33
Hambourg	53 33	7 38 36	25,38	32,19	17,21
New-Haven (Connecticut)	41 10	74 50 24	25,29	33,18	14,46
Penzance	50 12	7 52 24	25,42	33,32	18,68
Bruxelles	52 31	2 1 36	25,65	32,64	18,90
Cambridge (Massach)	42 23	74 37 24	25,65	32,35	17,17
New-Bedford	41 59	74 10 24	25,65	33,45	16,51
Gœttingue	51 32	7 34 36	25,74	32,01	17,55
Jakouzk	62 2	127 21 36	25,92	25,72	20,39
Tomsk	59 39	80 49 36	26,01	31,58	17,66
Caterinenbourg	56 50	58 14 36	26,64	34,81	19,67
Bristol	51 27	4 55 24	26,73	34,13	19,92
La Haye	52 5	1 58 36	26,94	34,90	18,34
Copenhague	55 41	10 13 36	27,77	34,49	20,03
Londres	51 31	2 20 24	27,88	35,15	20,32
Franecker	52 36	1 58 36	27,93	34,15	22,26
Gosport	50 48	3 26 24	28,69	34,76	21,14
Middelbourg	51 30	1 16 36	28,99	38,44	20,03
Iloulouk	53 53	170 49 24	28,99	34,88	19,22
Pétersbourg	59 36	27 58 36	29,24	36,93	19,97
Tornéa	65 51	21 49 36	29,75	38,42	21,61
Stockholm	59 21	15 42 36	29,87	37,97	22,11
Abo	60 27	19 59 36	29,96	37,20	19,76
Upsal	59 52	15 18 36	30,16	36,88	21,43
Bergen	60 24	3 00 36	31,27	37,13	22,74
Nain (Labrador)	57 8	63 48 24	32,35	40,61	24,43
Umeo	63 50	17 54 36	32,39	39,50	22,06
Christiania	59 55	8 28 36	33,05	41,87	22,06
Naes (Islande)	64 30	22 35 24	35,91	.....	.....

baisse extraordinaire dans un point du globe est compensée par une hausse extraordinaire sur un autre point. Cela tient évidemment à ce qu'il se forme dans l'océan aérien comme des vagues qui s'étendent d'un pays à un autre, et dont les points voisins sont également affectés, tandis que deux points éloignés peuvent se trouver l'un à l'endroit où la vague s'élève, l'autre au point où elle s'abaisse.

État du baromètre par différents vents. — Depuis que l'on s'est mis à étudier la pression de l'air à l'aide du baromètre, les physiciens se sont aperçus

qu'il variait suivant l'état de l'atmosphère, et principalement pendant les orages.

Lambert, en 1771, est le premier qui ait pensé à observer les hauteurs barométriques correspondant aux différents vents régnants, et à réunir un grand nombre d'observations, afin de pouvoir en tirer des déductions exactes; après lui, on a suivi cette marche, et on a pu trouver, en moyenne, la pression barométrique correspondant à chacun des 8 vents principaux, dans les latitudes moyennes; c'est ce qu'on appelle la rose des vents barométriques.

Nous donnons ici la rose des vents barométriques de Paris.

HAUTEURS BAROMÉTRIQUES PAR DIFFÉRENTS VENTS A PARIS,

d'après M. Bouvard. (*Mémoires de l'Institut*, t. VII, p. 277.)

VENTS.	HAUTEUR BAROMÉTRIQUE MOYENNE.			HAUTEUR BAROMÉTRIQUE moyenne.	EXCÈS des hauteurs moyennes par différents vents, sur la moyenne générale 756,414.
	à 9 h. du mat.	à midi.	à 3 h. du soir.		
	mm	mm	mm	mm	mm
S.	752,687	752,976	752,615	752,757	— 3,657
S.-O.	753,654	752,382	752,650	753,227	— 3,187
O.	756,092	756,081	755,678	755,950	— 0,464
N.-O.	759,120	758,670	757,439	758,412	+ 1,998
N.	760,143	759,761	759,368	759,776	+ 3,362
N.-E.	759,890	759,891	759,232	759,672	+ 3,258
E.	757,960	757,045	756,717	757,221	+ 0,807
S.-E.	754,358	754,599	753,949	754,300	— 2,114
	756,738	756,426	755,956	756,414	»

Ces nombres, ainsi que ceux qui expriment les roses des vents barométriques d'autres localités de nos climats, font voir que le baromètre est très-haut quand le vent souffle entre l'est et le nord, et très-bas quand il souffle entre le sud et l'ouest; la hauteur varie assez régulièrement entre ces deux extrêmes. Dans quelques endroits, cependant, on trouve des anomalies qui n'ont pas encore été bien expliquées, mais qui proviennent de causes locales.

D'après le tableau précédent, on remarque qu'à Paris l'excès de la hauteur barométrique, pour le vent du N.-E., sur celle qui correspond au vent du S.-O., est de plus de $7^{\text{mill.}}$

On trouve des lois analogues dans d'autres contrées: seulement, le vent correspondant au maximum de pression varie suivant la position des localités. Aux États-Unis, c'est vers le N.-O. que le baromètre est le plus haut, avec le S.-E. le plus bas. Il en est de même à Péking.

On peut conclure de ces diverses observations qu'en général le baromètre atteint son maximum quand les vents soufflent du nord et de l'intérieur des continents, et son minimum lorsqu'ils viennent des régions tropicales et de la mer; c'est-à-dire que les vents froids augmentent la pression, tandis que les vents chauds la diminuent.

Si dans les recherches de cette nature on a égard à l'heure du jour, alors on reconnaît que le vent changeant dans le cours d'une journée, le baromètre doit donner des indications dépendant de sa direction, et monter ou descendre suivant qu'il passe au N.-E. ou au S.-O.; l'influence du changement de vent qui a lieu dans la même journée, changement dont nous parlerons dans le paragraphe suivant, se fait donc sentir d'une manière manifeste. On comprend aussi d'après cela que les roses des vents barométriques de lieux même assez rapprochés, doivent présenter des anomalies.

Les différences que présentent les oscillations diur-

nes du baromètre, dans un même mois, considérées dans différentes années, reconnaissent la même cause, et il faut un grand nombre d'observations pour déduire dans nos climats la période régulière, car l'amplitude de cette période diminue de l'équateur aux pôles, et les variations irrégulières suivent une marche inverse et augmentent sous nos latitudes.

Des localités peu éloignées les unes des autres offrent des différences que l'on apprécie facilement, en calculant leur différence de niveau au moyen des colonnes barométriques; on trouve alors qu'entre deux stations, la hauteur, calculée de cette manière, est plus ou moins grande, suivant le vent régnant ; ce qui montre que l'air n'est pas partout dans les mêmes conditions, et que l'on ne peut conclure l'élévation d'un lieu que d'après un grand nombre d'observations; ainsi, par exemple, d'après Brandes, la hauteur du Saint-Gothard au-dessus de Genève est égale à la moyenne avec le vent du S.-E., tandis qu'elle est trop grande avec les vents du N.-O.

SECTION IV.

CAUSE DES VENTS ET DES VARIATIONS BAROMÉTRIQUES.

§ I. — *Causes des vents.*

Nous avons vu que, dans les régions équatoriales, loin des continents, le vent souffle avec régularité de l'E. à l'O.; du N.-E. dans l'hémisphère nord, et du S.-E. dans l'hémisphère sud. Près des terres, les vents sont périodiques et dépendent des saisons. Les vents perdent de leur régularité en s'éloignant de l'équateur, et l'on ne retrouve une périodicité bien manifeste que le long des côtes et dans les pays de montagnes, où les masses d'air éprouvent un déplacement qui tient à la période diurne; sous les latitudes moyennes, on ne rencontre que des vents variables qui affectent cependant une tendance moyenne S.-O. et N.-E.; à mesure que l'on s'approche des régions polaires, les vents

sont plus faibles, et, suivant quelques navigateurs dans les mers polaires boréales, le vent du N.-E. est celui qui prédomine.

Quelles sont les causes de ces vents? Telle est la question que les météorologistes se sont efforcés de résoudre, et pour laquelle diverses hypothèses ont été proposées; mais ces théories laissent beaucoup à désirer, attendu que la dynamique des fluides est tellement compliquée, que l'on ne connaît pas tous les effets qui peuvent se manifester dans les masses atmosphériques. La direction des vents, les effets réguliers des moussons, les brises de mer et de terre, les périodes diurnes du baromètre, montrent seulement que l'inégal échauffement des masses gazeuses est la cause principale de ces grands déplacements généraux.

Lorsque le soleil s'élève sur l'horizon et qu'il échauffe par communication une certaine portion P de la surface de la terre MN (planche II, fig. 3), aussitôt l'élévation de température se transmet aux couches d'air inférieur. Ces couches *ab*, *a'b'*, etc., à égalité de température, sur une surface plane, seraient parallèles au sol; mais en s'échauffant, elles s'élèveront et présenteront une courbure concave vers la terre, les points les plus élevés étant vis-à-vis de P. Ainsi, dans un lieu échauffé, la colonne atmosphérique PQ doit nécessairement éprouver une certaine élévation.

Toutes les théories qui s'appuient sur l'échauffement de l'atmosphère partent de ce principe, mais elles divergent ensuite, et il ne peut en être autrement, car on ne sait pas, dans cette masse gazeuse, quel est l'effet final de l'augmentation de température de la portion PQ, qui ne se fait sentir qu'entre une certaine limite d'élévation. D'une part, l'échauffement graduel élevant le centre de gravité de la colonne PQ, doit donner lieu à une diminution de poids, contre-balancée en partie ou en totalité par l'augmentation de pression qui doit résulter du point d'appui que prend la colonne pour s'élever ainsi; d'autre part, deux masses fluides de den-

sité inégale ne peuvent pas rester en équilibre en présence l'une de l'autre avec des surfaces de séparation autres que des surfaces horizontales. On peut citer à cette occasion l'expérience de Franklin : Si l'on ouvre une porte servant à faire communiquer deux pièces d'un appartement, dont l'une possède une température plus élevée que l'autre, on observe deux courants d'air, l'un inférieur dirigé de la pièce froide dans la pièce chaude, et l'autre supérieur dirigé en sens inverse; on les rend sensibles par les directions que prennent les flammes de deux bougies placées l'une au haut, l'autre au bas de la porte. D'après ce que l'on vient de voir, il doit donc se manifester des déplacements dans les couches gazeuses des régions où se fait sentir l'effet de la dilatation, et même au delà.

L'explication des vents alizés, dont l'idée est attribuée à Halley, et qui a été admise depuis par Laplace (*Mécanique céleste, exposée du système du monde*, t. VI, p. 340) et par les météorologistes actuels, repose sur le principe suivant : Si en un point P du globe, la colonne PQ vient à être échauffée, l'air froid en A et B, à droite et à gauche de PQ, doit s'écouler à la surface du sol vers P, et alors, dans les parties supérieures, il doit exister des courants gazeux en sens inverse, qui viennent épancher les colonnes d'air soulevées par la dilatation au-dessus de leur véritable niveau.

Une fois ce principe admis, on en déduit facilement l'explication des vents, alizés, périodiques, et variables de nos contrées. En effet, la température décroissant avec la latitude, surtout rapidement vers le parallèle de 40°, et les masses d'air, sous les tropiques, étant plus échauffées que dans les latitudes élevées, il y a afflux d'air à la surface du globe vers l'équateur, et courants inverses supérieurs, qui doivent déverser l'air de l'équateur vers les latitudes élevées.

Dans une certaine étendue de chaque côté de l'équateur, il ne devrait donc y avoir à la surface du globe que des vents du nord et des vents du sud; mais le

changement de vitesse de l'air dans le sens des méridiens, vitesse due au mouvement de rotation de la terre, influe sur ce phénomène. En effet, toutes les parties de l'atmosphère tournent avec la terre; lorsque, par suite de l'inégal échauffement de la surface du globe, les particules d'air inférieures sont apportées des pôles vers l'équateur ou d'une région dans laquelle elles ont une certaine vitesse, dans une autre où elles ont une vitesse moindre que celle des particules qui s'y trouvent, elles semblent se mouvoir en sens inverse du mouvement de la terre; un corps solide les choque d'occident en orient, et il se produit le même effet que s'il naissait un vent dirigé de l'est à l'ouest. Mais comme les molécules ont déjà une certaine vitesse des pôles vers l'équateur, elles obéissent à la résultante de deux actions, et l'observateur se trouve impressionné, comme s'il y avait dans la région boréale de l'équateur un courant constant inférieur N.-E., et dans la région australe un courant constant S.-E., ces deux courants se dirigeant vers l'équateur. Nous avons vu que c'est en général de 10 à 30 degrés que les vents inférieurs N.-E. et S.-E. soufflent avec plus de force et d'énergie. Vers l'équateur, là où les vents se rencontrent, il se produit un vent d'est, et l'air commence à participer au mouvement ascensionnel. Il est bien évident que l'on n'observe ces effets que loin des continents et en pleine mer; car des actions locales peuvent donner lieu à des courants d'air précisément inverses.

Les colonnes d'air qui ont été aspirées vers l'équateur, retombant sur la terre dans les latitudes élevées, ont un excès de vitesse de rotation de l'est à l'ouest que leur a donné le séjour à l'équateur, d'où résulte, dans cette région, tendance au vent d'ouest. A la partie supérieure, comme l'air est porté vers les pôles, les résultantes des actions donnent lieu à un vent S.-O. supérieur dans l'hémisphère nord, et N.-O. dans l'hémisphère sud.

On a des observations qui viennent à l'appui de

l'existence de ces vents supérieurs : en 1812, il y eut une grande éruption volcanique à Saint-Vincent, et il tomba à la Barbade, qui en est éloignée de plus de 30 lieues, une grande quantité de cendres en sens inverse du courant d'air inférieur. On est porté à supposer que les cendres ont été transportées par le courant d'air supérieur ou l'alizé supérieur.

Dans cette hypothèse sur l'origine des vents, les moussons et les vents périodiques s'expliquent avec la même facilité. En effet, lorsqu'un vaste continent s'échauffe, il peut donner lieu à des effets analogues, à un vent alizé local, si on peut s'exprimer ainsi : telle est l'origine des moussons de l'océan Indien. Ces vents sont produits par des colonnes d'air ascensionnelles qui s'élèvent par suite de l'échauffement de la péninsule de l'Indostan, du nord de l'Inde et de la Chine ; ces colonnes d'air donnent naissance à des vents dirigés vers les points les plus échauffés. Lorsque le soleil a ses déclinaisons boréales, en été, depuis le mois d'avril jusqu'en octobre, la température de l'air est plus élevée que celle de la mer, tandis qu'elle baisse dans la Nouvelle-Hollande et dans l'Afrique méridionale ; l'air équatorial, à rotation rapide, est donc attiré vers les parties échauffées, et produit dans l'océan Indien un vent constant du S.-O.; lorsque le soleil reprend ses déclinaisons australes d'octobre en avril, les portions échauffées sont les parties australes de la mer, et la mousson nord prend naissance. Pendant les équinoxes, la température de la mer et de la terre tendant à s'équilibrer, il n'y a plus de vents constants, mais des vents variables, alternant avec des calmes plats et des ouragans.

Les brises de mer et de terre, les vents des montagnes, se déduisent également de cette théorie, et il n'est pas nécessaire de suivre pas à pas la description que nous en avons donnée pour le démontrer, car l'explication en est très-simple. Quant aux vents variables de nos contrées, on s'en rend compte de la manière suivante : On admet que les contre-courants des vents alizés in-

férieurs, à mesure qu'ils arrivent dans des latitudes plus élevées, se refroidissent, et par suite d'une augmentation de densité, s'abaissent vers 30° de latitude; ce serait là, d'après cette manière de voir, l'origine des vents du S.-O. qui règnent en général jusque vers les pôles dans l'hémisphère nord.

La température de nos climats étant plus élevée que celle des régions polaires, il devrait exister dans nos contrées, depuis les pôles, un courant N.-E., apportant l'air des pôles vers l'équateur; mais on répond à cela que, dans les latitudes moyennes, les courants N.-E. sont contre-balancés par les vents du S.-O., et que les vents N.-E. ne reprennent le dessus, comme nous l'avons dit déjà page 317, que dans les régions polaires. On s'appuie, pour établir cette conséquence, sur ce fait déjà cité, que, dans la détermination de la fréquence des vents, on a un maximum correspondant au S.-O., et un autre au N.-E. M. Dove a même conjecturé que le vent S.-O. soufflerait sur les mers, tandis que celui du N.-E. régnerait dans l'intérieur des continents; les observations ultérieures pourront seules décider la question.

Il n'est pas sans intérêt, à propos de cette hypothèse sur l'origine des vents, d'indiquer comment M. Dove a déduit les vents variables de nos contrées de la lutte des vents de S.-O. et de N.-O.; si les vents S.-O. soufflent en A et en C (planche 2, fig. 5), et le vent N.-E. en B, là où ils se rencontreront, il se formera des tourbillons dans la direction des flèches indiquées sur la figure, et on aura des courants dirigés dans différents sens. M. Dove, d'après le même principe, explique comment les vents doivent se succéder dans un certain ordre. Si la limite qui sépare les deux vents se déplace, la direction du vent change dans un même lieu; en rassemblant un grand nombre d'observations, il a trouvé que, dans l'hémisphère boréal, le vent passe le plus souvent de l'est à l'ouest par le sud, et dans l'hémisphère austral de l'est à l'ouest par le nord.

Cette cause peut bien donner lieu à des vents dans différents sens; mais il est probable qu'un des principaux motifs de la variation des vents dans nos contrées est l'échauffement inégal des régions sur lesquelles repose l'air : si l'occident de l'Europe s'échauffe, et que l'orient, par suite d'un ciel couvert, s'échauffe moins, il en résultera un vent d'est; lorsqu'il rencontrera le vent S.-O., il y aura une résultante qui donnera lieu à un vent S.-E., qui pourra même être vent du S. De même, si un pays s'échauffe beaucoup plus que tous les pays voisins, l'air y affluera de tous les côtés; il se manifestera donc des vents différents suivant la position de l'observateur.

On voit, d'après le rapide exposé que nous venons de faire, que le principe dont on est parti de l'afflux de l'air inférieur vers les parties échauffées, et des courants supérieurs inverses, sert à faire concevoir comment les mouvements de l'air s'opèrent à la surface du globe. On peut encore faire une remarque à l'appui de ce qui précède, touchant l'extension des alizés jusque dans nos climats, et la lutte entre les vents du N.-E. et du S.-O.; dans notre été, lorsque le soleil a ses déclinaisons boréales, le vent du N.-E., devant s'étendre plus loin dans nos contrées, tend à donner une direction nord aux vents variables de nos climats: c'est en effet ce qui a lieu (voyez page 318).

M. Saigey (*Petite physique du globe*) a fait les objections suivantes à la théorie que nous venons d'exposer. Comment se fait-il que, dans nos régions tempérées, où la chaleur et le mouvement de rotation croissent plus vite que vers l'équateur, on n'éprouve pas un vent et même un ouragan perpétuel de l'est à l'ouest, tandis que la tendance générale des vents est de l'ouest à l'est? M. Saigey ne voit pas non plus comment le mouvement ascensionnel peut se manifester des couches inférieures dans les couches supérieures; car la dilatation qui résulte de l'échauffement des couches d'air à la surface du sol ne suffit pas, d'après la loi du décroissement de la température de l'atmosphère de 1° par 172 ou 180 mètres,

pour leur donner une densité moindre que celle des couches qui reposent sur elles. On pourrait répondre à cette objection en disant qu'il peut se faire que le mouvement ascensionnel soit produit, non pas seulement par l'élévation des couches d'air au-dessus de leur niveau par la dilatation seule, mais bien encore par suite des actions dues à l'arrivée des molécules d'air inférieures vers la partie échauffée.

M. Saigey a proposé alors la théorie suivante, pour expliquer les effets produits. Suivant lui, les inégalités du sol ont seules une influence sur l'équilibre des couches inférieures de l'atmosphère; si l'on suppose que la surface du globe soit un ellipsoïde de révolution, que partout la surface soit celle des eaux tranquilles, les couches d'égale élasticité seront horizontales, et la dilatation ou la contraction des couches d'air ne fera qu'écarter ou rapprocher les couches de la surface. Mais si l'on conçoit qu'en un lieu PN de la surface de la terre MN (planche 2, fig. 4), se trouve une élévation, une montagne, et que la température s'élève dans la plaine PM, les couches *ab*, *a'b'*...., se dilatant, la hauteur de la colonne d'air CE=GF, ne pèsera pas autant qu'auparavant. La pression atmosphérique restant la même sur la montagne en F, et étant plus forte en E, sur une même horizontale, l'air affluera vers la montagne. Si la masse d'air MPD se contractait, au lieu de se dilater, alors l'inverse aurait lieu, et l'air coulerait le long de la montagne de haut en bas. Ainsi cela revient à dire, en résumé, que si les couches d'air situées à la surface de la terre se dilatent, il se forme une espèce d'aspiration le long des inégalités à la surface du sol, et l'air afflue des lieux bas dans les lieux élevés; si, au contraire, l'air se contracte, l'inverse a lieu, et l'air coule des lieux élevés dans les lieux bas. M. Saigey, partant de ce principe, qui rend compte, sans autres détails, des vents de montagnes, montre comment les brises de mer et de terre prennent naissance, en considérant les continents comme de vastes plateaux s'éle-

vant à partir des côtes au-dessus de la surface des eaux tranquilles. Il admet que ces mouvements périodiques diurnes, qui participent aux inégalités du sol, se régularisent à l'approche de la vaste et uniforme étendue des mers, et que le mouvement annuel de l'atmosphère d'un hémisphère dans l'autre, suivant les déclinaisons du soleil, donne naissance aux moussons; enfin que loin des côtes apparaissent les alizés, qui sont la résultante immédiate des moussons et de toutes les brises. Ainsi ce serait, suivant M. Saigey, la résultante de l'écoulement de l'air le long des inégalités de la surface du globe, par suite de l'échauffement sous diverses latitudes, qui donnerait lieu aux vents des régions équatoriales. On ne conçoit pas dans cette hypothèse comment les résultantes des brises peuvent s'établir de manière à donner ces courants d'air si réguliers du Grand Océan, loin des côtes des deux continents.

En résumé, la première théorie dont nous avons parlé suppose que, lorsque cette dilatation a lieu, l'air afflue à la surface du sol vers les parties échauffées; tandis que dans la seconde les courants d'air ne peuvent s'établir, quand l'air s'échauffe, que par suite des inégalités de la surface terrestre, et alors l'air s'écoule à la surface, des lieux bas vers les lieux élevés.

Il résulte de ce qui précède qu'il est impossible, dans l'état actuel des connaissances, de donner une théorie complétement satisfaisante des vents, quoique l'on sache que l'action calorifique du soleil ou la dilatation des couches d'air soit la cause du déplacement des masses atmosphériques. Tout ce qui concerne la dynamique des fluides est fort peu connu, et ce n'est que par des observations suivies que l'on pourra arriver à la connaissance de toutes les causes déterminantes des vents. C'est pour ce motif que nous avons décrit les résultats des observations relatives aux vents et aux variations barométriques dans une section à part, abstraction faite des explications, et que nous n'avons parlé de celles-ci qu'après cette description.

Quant aux déplacements de l'air qu'occasionnerait le mouvement de rotation de la terre, et qui laisserait en

retard l'atmosphère, hypothèse soutenue par Bernouilli, et reproduite depuis, on n'a pas trouvé des raisons suffisantes pour admettre qu'ils puissent exister. Il est à regretter que l'on n'ait pas plus de notions sur les vents qui règnent à diverses hauteurs, et qui pourraient nous initier sur la cause des déplacements de l'atmosphère.

§ 2. — *Causes des variations régulières du baromètre.*

Il est très-difficile de se rendre compte des oscillations régulières et irrégulières du baromètre. On avait d'abord cherché à expliquer ces oscillations par l'attraction du soleil et de la lune, attraction qui déterminerait des flux atmosphériques analogues aux marées; mais, quoique l'on observe des flux atmosphériques périodiques et suivant les mouvements apparents du soleil et de la lune, il est certain, comme on va le voir, que les variations diurnes ne dépendent pas de l'attraction moléculaire, mais bien des effets dus à l'inégal échauffement de l'air par suite de l'action calorifique du soleil.

Laplace, en faisant usage des observations barométriques de M. Bouvard, de 1815 à 1823, pendant huit ans, a trouvé à Paris $0^{mm},055$ pour l'amplitude du flux lunaire, et $3^{h}\frac{1}{3}$ pour l'heure de son maximum du soir le jour de la syzygie (*Mécanique céleste*, tom. VI, pag. 338). Ce grand géomètre pense que l'on ne peut pas attribuer ces effets à l'attraction moléculaire du soleil et de la lune, qui s'exerce néanmoins sur l'atmosphère avant d'arriver à la terre; il croit qu'ils proviennent de l'élévation et de l'abaissement périodique de la mer, base mobile de l'atmosphère, dont la figure varie à chaque instant. Il résulte de là que l'action de ce flux est presque insensible dans l'intérieur de l'atmosphère très-agitée qui nous entoure, et qu'il n'est qu'une petite portion du flux qui suit régulièrement la marche du soleil.

Plusieurs physiciens ont fait des séries d'expériences pour calculer la valeur du flux atmosphérique. M. Flaugergues, dans une longue suite d'observations de vingt années, de 1808 à 1828, faites à Viviers (Ardèche), a

conclu que les hauteurs moyennes barométriques de midi sont différentes, suivant les phases ou l'âge de la lune; il a trouvé pour les hauteurs moyennes :

	Hauteur barométrique moyenne.		Hauteur barométrique moyenne.
	mm		mm
Nouvelle lune.	755,48	pleine lune.	755,30
1er octant	755,44	3e octant	755,69
1er quartier	755,40	2e quartier.	756,23 (maxima)
2e octant	754,79 (minima)	4e octant	755,50

C'est à-dire que la hauteur barométrique décroît depuis la nouvelle lune jusqu'au 2e octant, pour atteindre ensuite son maximum au 2e quartier. La différence entre les hauteurs moyennes des quadratures et des syzygies est 0^mill.,42.

M. Aimé (*Annales de phys. et de chim.*, 3e série, t. XII, p. 291), d'après sept années d'observations faites dans le port d'Alger, est arrivé à conclure qu'il y avait une marée atmosphérique lunaire, mais différente de celle que l'on déduit des observations de M. Flaugergues. En effet, il a trouvé pour les hauteurs du baromètre correspondant aux âges de la lune :

JOURS.	HAUTEUR barométrique.	JOURS.	HAUTEUR barométrique.	JOURS.	HAUTEUR barométrique.
1	762,73 (maximum.)	11	761,89	21	761,82
2	762,09	12	761,49	22	761,52
3	762,90	13	761,45	23	761,48
4	761,39	14	760,70	24	761,34
5	761,53	15	760,56	25	761,22
6	761,77	16	761,38	26	760,47 (minimum.)
7	761,62	17	761,31	27	761,00
8	761,38	18	761,30	28	761,57
9	761,65	19	761,77	29	761,92
10	761,58	20	761,88	30	762,44

Le maximum a lieu le 1er jour lunaire, et le minimum le 26e jour; cependant on aperçoit un second minimum le 14e jour. Il serait nécessaire, comme le remarque M. Arago (*Annuaire du bureau des longitudes*, 1833, pag. 170 et suiv.), de faire des observations suivies, mais aux différentes heures de la journée, car ce n'est pas sur les hauteurs moyennes de midi, les jours de syzygie et de quadrature, que l'on peut calculer l'action lunaire, mais bien sur les variations diurnes.

Les observations faites jusqu'ici montrent bien qu'il y a un flux lunaire dont l'amplitude est très-faible, mais ce ne sera que par de longues suites de résultats que l'on pourra décider sa nature; en tout cas, il n'est qu'une fraction de la variation diurne barométrique.

D'après ce que nous avons vu dans les paragraphes précédents, on observe une espèce d'antagonisme entre les variations barométriques et les variations thermométriques, de sorte que lorsque le thermomètre baisse, le baromètre monte, *et vice versa*, c'est-à-dire que le baromètre est une espèce de thermomètre différentiel qui indique si la température monte ou descend au-dessus ou au-dessous de la moyenne, abstraction faite, bien entendu, des variations accidentelles dues au changement de vent. Mais lors de l'accroissement de température, la vapeur d'eau augmentant de tension, M. Dove a construit des tableaux pour représenter la pression de l'air sec, en retranchant la pression due à la vapeur de la pression barométrique totale; il a trouvé ainsi qu'à Apenrade, au lieu des deux maxima et des deux minima, il n'y a qu'un maximum et un minimum diurne pour l'air sec; le minimum a lieu vers l'instant de la plus forte chaleur du jour, et le maximum dans la nuit, quand l'air s'est refroidi; la tension de la vapeur d'eau augmentant depuis le matin jusque dans la journée, la pression totale s'accroît: de là le maximum le matin, puis le minimum du soir; enfin, quand la température baisse, à partir de 3 heures, la pression de l'air sec augmente, la pression de la vapeur d'eau diminue, et il en résulte

un second maximum de pression atmosphérique totale vers 9 heures du soir.

Les résultats déduits par M. Kæmtz, pour la pression de l'air sec, dans d'autres localités, présentent des différences avec les précédents ; ainsi l'explication de M. Dove ne saurait rendre compte de toutes les anomalies. Il y a une cause d'erreur assez grande qui provient de ce que l'on prend pour tension de la vapeur d'eau la tension à la surface de la terre, tandis que cette tension est différente, suivant la température, à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère; de plus les agitations de l'air et le mélange des masses gazeuses doivent troubler la régularité du phénomène de diminution de pression, en calculant celle-ci d'après la loi du décroissement de température avec la hauteur.

Il résulte de toutes les observations que nous avons rapportées, que les variations horaires barométriques, comme les vents, sont évidemment dues aux changements de température des masses gazeuses sans que l'on ait actuellement d'explication satisfaisante de leur production.

SECTION V.

DE L'HYGROMÉTRIE.

L'eau à l'état de vapeur est un des éléments constituants de l'atmosphère; la quantité qui s'y trouve est très-variable, et dépend de la température, des vents et de diverses causes locales; elle va en diminuant, toutes choses égales d'ailleurs, à mesure que l'on s'élève au-dessus du niveau de l'Océan, de sorte qu'à une certaine hauteur la quantité d'eau qui existe est tout à fait négligeable. Les brouillards, les nuages et tous les météores aqueux atmosphériques sont dus aux différents états de condensation de la vapeur d'eau; mais, avant de donner leur description, il est nécessaire de connaître les instruments servant à apprécier la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air, et ses variations suivant les vents régnants et les saisons.

§ I. — *De la force élastique de la vapeur d'eau dans les gaz, et du poids d'un volume d'air saturé de vapeur à diverses températures.*

Les trois états solide, liquide et gazeux, que nous présentent les corps, dépendent de l'équilibre des forces attractives et répulsives qui s'exercent entre les molécules. Les forces répulsives sont en rapport avec la quantité de chaleur renfermée dans les corps, puisque, à mesure que la température s'élève, les molécules s'écartent de plus en plus, et les corps passent de l'état solide à l'état liquide, puis à l'état gazeux. Dans l'état solide, l'équilibre dépend de la figure des molécules; dans l'état liquide, il n'en est plus ainsi. Dans l'état gazeux, les forces répulsives l'emportent sur les forces attractives, et si les molécules n'étaient pas retenues par les parois des vases ou par une pression extérieure, elles s'éloigneraient les unes des autres. Cette force, qui naît de l'action répulsive des molécules, a été nommée force élastique ou tension; et comme dans un espace déterminé, pour maintenir en équilibre un gaz ou une vapeur, il est nécessaire de contre-balancer sa force élastique par une pression égale et contraire, on emploie indifféremment les mots *force élastique*, *tension* et *pression*, comme synonymes l'un de l'autre.

Lorsqu'un liquide est abandonné à lui-même, il se forme continuellement, à la surface de séparation de ce liquide et de l'atmosphère, des vapeurs dont la quantité dépend de la température et de la quantité de vapeur de ce liquide existant déjà dans l'atmosphère qui repose sur lui. Ainsi, lorsque de l'eau placée dans un vase est exposée dans une enceinte à une température déterminée, la quantité d'eau qui s'évapore dépend de la température et de l'humidité de l'air extérieur; si l'air est saturé, il ne s'évapore rien; s'il est très-sec et qu'il ne contienne pas d'eau, l'évaporation est très-active. La quantité de vapeur nécessaire pour saturer un espace donné, à une température déterminée, est indépendante

de la pression extérieure des gaz; de telle sorte que les molécules de vapeur glissent entre les molécules d'air, et se forment dans les gaz comme dans le vide (1), mais plus lentement.

La force élastique de la vapeur, lorsque l'espace est saturé, se nomme *force élastique maximum*, ou tension maximum de la vapeur, et le degré hygrométrique ou le degré d'humidité est le rapport de la force élastique de la vapeur qui se trouve à ce moment dans cet espace, à la force élastique que l'on observerait si l'espace était saturé. En appelant f la force élastique de la vapeur d'eau se trouvant à un instant donné dans l'air, et F la force élastique maximum dans les mêmes circonstances, $\frac{f}{F}$ mesurera l'humidité. On conçoit fort bien, d'après cela, que l'air puisse avoir la même humidité et ne pas contenir la même quantité absolue de vapeur; car si la température s'élève, la force élastique maximum augmente, et F devenant plus grand, f qui indique la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air peut être également plus grand sans que le rapport $\frac{f}{F}$ soit changé. Il faut bien se souvenir que ce rapport seul est celui qui mesure l'humidité, et nullement la tension f considérée séparément.

Plusieurs physiciens ont donné des tables de tension de vapeur d'eau à diverses températures. Nous rapporterons les nombres suivants, extraits du travail de M. Regnault sur l'hygrométrie. (*Annales de Physique et de Chimie*, t. XV, 1845, p. 138.)

(1) M. Regnault, en cherchant directement les forces élastiques de la vapeur d'eau dans les gaz, a trouvé une petite différence en plus et constante dans les nombres calculés exprimant la tension dans le vide; cette différence, qui ne dépasse pas 3/4 de millimètre de mercure lorsque la pression varie de 4 à 50 millimètres, peut résulter d'une erreur constante dans le procédé d'expérimentation. Néanmoins on admet en principe général, que la vapeur se forme dans les gaz comme dans le vide.

DEGRÉS de température.	TENSION MAXIMUM de la vapeur d'eau.	POIDS de la vapeur contenue dans 1m cube d'air saturé.	DEGRÉS de température.	TENSION MAXIMUM de la vapeur d'eau.	POIDS de la vapeur contenue dans 1m cube d'air saturé.
	mm	gr.		mm	gr.
— 10	2,078	2,302	+ 13°	11,162	11,383
— 9	2,261	2,495	14	11,908	12,103
— 8	2,456	2,701	15	12,699	12,860
— 7	2,666	2,921	16	13,536	13,621
— 6	2,890	3,156	17	14,421	14,504
— 5	3,131	3,406	18	15,357	15,393
— 4	3,387	3,672	19	16,346	16,327
— 3	3,662	3,956	20	17,391	17,311
— 2	3,955	4,281	21	18,495	18,448
— 1	4,267	4,575	22	19,659	19,437
0	4,600	4,915	23	20,888	20,581
+ 1	4,940	5,260	24	22,184	21,785
2	5,302	5,623	25	23,550	23,067
3	5,687	6,010	26	24,988	24,374
4	6,097	6,420	27	26,505	25,767
5	6,534	6,845	28	28,101	27,226
6	6,998	7,316	29	29,782	28,762
7	7,492	7,804	30	31,548	30,368
8	8,017	8,322	31	33,405	32,054
9	8,574	8,869	32	35,359	33,812
10	9,165	9,445	33	37,410	35,655
11	9,792	10,055	34	39,565	37,583
12	10,457	10,696	35	41,487	39,281

Les nombres inscrits dans la deuxième colonne indiquent les pressions en millimètres de mercure; ceux de la troisième, le poids de la vapeur contenue dans un mètre cube d'air saturé. On voit que bien au-dessous de zéro la force élastique maximum est sensible; ce qui montre que l'eau, même à l'état de neige, peut s'évaporer. Entre 10° et 30°, la force élastique augmente, à peu de chose près, proportionnellement aux températures, mais passé 30° elle croît plus rapidement, car à 100° la tension est 760mm de mercure.

La densité de la vapeur est sensiblement 0,622 ou les $\frac{5}{8}$ de la densité de l'air dans les mêmes circonstances de température et de pression (1). Il est facile de calculer d'après ce nombre le poids de la vapeur que renferme un espace déterminé à une température donnée et pour un degré d'humidité également connu.

Si l'on désigne par t la température et par f la force élastique de la vapeur d'eau à cet instant dans l'air, en cherchant dans la table précédente le nombre F, qui donne la force élastique maximum à cette même température, $\frac{f}{F}$ sera le degré hygrométrique ou l'humidité.

En représentant par p le poids de la vapeur contenue dans un litre d'air, dans les mêmes circonstances et avec la pression f, et par P le poids que l'on obtiendrait si l'air était saturé, on aura

$$p = 0,622 \frac{1^{gr.},299}{1 + 0,00367\, t} \cdot \frac{f}{760^{mill.}}$$

et $$P = 0,622 \frac{1^{gr.},299}{1 + 0,00367\, t} \cdot \frac{F}{760^{mill.}}$$

0,622 est la densité de la vapeur; $1^{gr},299$ le poids d'un

(1) On avait annoncé que la densité 0,622 de la vapeur d'eau augmentait avec la température, mais M. Regnault a vu que cette densité restait sensiblement la même, et que, par conséquent, la loi de Mariotte et la loi de dilatation pouvaient s'appliquer à la vapeur comme à l'air, attendu que les résultats calculés et les résultats obtenus directement diffèrent très-peu les uns des autres. La loi donnée par le calcul ne se vérifie par expérience qu'autant que la vapeur d'eau ne sature pas l'espace et que le degré hygrométrique ne dépasse pas 0,8; au delà on obtient des résultats un peu plus forts qui montrent que la vapeur éprouve une espèce de condensation anomale en approchant du point de saturation, ou bien que dans les expériences entreprises dans le but de vérifier cette loi, une portion de la vapeur d'eau reste condensée sur les parois des vases. Il peut se faire que l'action hygroscopique des vases, et surtout des vases en verre, soit le motif de la divergence des résultats obtenus par différents physiciens.

litre d'air sec à 0° de température et 760^{mm} de pression; 0,00367 le coefficient de dilatation de l'air.

On voit en outre que $\frac{f}{F}=\frac{p}{P}$, c'est-à-dire que l'humidité est aussi le rapport du poids de la vapeur contenue dans un espace déterminé, au poids de la vapeur qui s'y trouverait si l'air était saturé.

Il est donc nécessaire de déterminer à un instant donné le poids ou la tension de la vapeur contenue dans l'atmosphère; on en déduit ensuite, d'après ce que nous avons vu, le degré hygrométrique.

On fait usage, pour cette détermination, d'appareils nommés hygromètres, construits d'après diverses méthodes; il y en a quatre principales servant à obtenir le degré d'humidité de l'air. (Voyez le *Mémoire de M. Regnault sur l'hygrométrie*, *Annales de physique et de chimie*, 1845, t. XV, p. 163.)

1re *Méthode*. — Cette méthode consiste à effectuer une véritable analyse chimique; on fait passer une quantité déterminée d'air dans un tube rempli de ponce imbibée d'acide sulfurique, ou de morceaux de chlorure de calcium; alors la masse gazeuse qui circule dans l'appareil cède l'eau qu'elle renferme, et l'augmentation de poids du tube donne le poids de l'eau contenue dans le volume d'air. Connaissant la température, on détermine à l'aide de la table indiquée plus haut le degré d'humidité. Cette méthode, qui est rigoureuse, sert à comparer la marche des autres hygromètres; elle a l'inconvénient d'être embarrassante et d'exiger une manipulation trop longue pour qu'on puisse l'employer en météorologie.

Il y aurait un grand intérêt, comme l'a fait remarquer M. Regnault, à faire usage de cette méthode pour trouver la quantité d'eau renfermée dans les brouillards et les nuages orageux, que traversent les voyageurs sur les hautes montagnes; l'eau, à l'état de vapeur vésiculaire ou de petites sphérules, n'agissant peut-être pas comme la vapeur sur les autres hygromètres.

2e *Méthode*. — Hygromètre par absorption, ou par

allongement ou changement de forme des matières organiques. On a successivement fait usage de diverses substances organiques pour accuser l'humidité de l'air : les cordes à boyau, les fanons de baleine, etc.; mais tous les appareils de ce genre sont plutôt des hygroscopes que des hygromètres, c'est-à-dire qu'ils accusent bien l'humidité plus ou moins grande de l'air, mais non le degré réel, attendu qu'ils ne sont pas comparables entre eux, condition indispensable pour des appareils mesureurs.

L'hygromètre à cheveu, qui est rangé dans cette catégorie, a été néanmoins longtemps en faveur parmi les physiciens, en raison des soins que de Saussure avait mis à le construire et à le graduer. Il se compose d'un cheveu bien dégraissé, de 24 à 30 centimètres de long, pincé par son extrémité supérieure, et maintenu verticalement, puis venant s'enrouler sur une petite poulie à sa partie inférieure. Sur cette poulie s'enroule également un petit fil qui porte un contre-poids, lequel tend légèrement le cheveu. La petite poulie porte une aiguille qui se meut sur un cadran divisé; lorsque le cheveu s'allonge ou se raccourcit, l'aiguille marche sur le cadran dans un sens ou dans un autre, et les indications peuvent servir à juger de l'allongement.

Cet instrument présente les inconvénients suivants : lorsque l'on en construit plusieurs de la même manière, avec des cheveux de même espèce, ils n'ont pas une marche identique; néanmoins ils ne donnent pas des indications assez divergentes pour qu'on ne puisse les regarder comme comparables. Si les hygromètres ne sont pas construits de la même manière et avec des cheveux semblables, ils peuvent présenter alors de grandes différences dans leurs indications, même lorsqu'ils s'accordent aux points fixes.

La longueur des cheveux doit être d'environ 24 centimètres. Il faut avoir l'attention de ne pas les tendre avec des poids au-dessus de $0^g,6$; on prend ordinairement des poids égaux à $0^g,2$ et $0^g,3$; quand le poids est

plus considérable, au bout de peu de temps, l'hygromètre n'est plus comparable à lui-même. Malgré les inconvénients que présente cet instrument, néanmoins, lorsqu'il est construit avec toutes les précautions possibles, il peut servir à un observateur qui l'emploie avec une très-grande circonspection. Il est d'un usage très-commode, surtout quand il est à poste fixe. Chaque appareil exige une table particulière que l'on vérifie le plus souvent possible, soit au moyen du procédé chimique, soit avec un hygromètre dont il sera question plus loin.

Pour graduer ces appareils, il faut employer, comme l'a fait la première fois M. Gay-Lussac, des dissolutions salines ou bien des combinaisons d'eau et d'acide sulfurique. En plaçant ces dissolutions à une température déterminée, sous la cloche de verre où se trouve l'hygromètre, on note le degré marqué par celui-ci dans chaque circonstance, et, comme l'on connaît, d'après des expériences préliminaires ou à l'aide des tables, les tensions de la vapeur contenue à cette température sous la cloche, on détermine le degré hygrométrique correspondant à chaque division de l'hygromètre. Le zéro correspond à la sécheresse extrême et le point 100° à l'humidité extrême; l'appareil marche d'abord rapidement, quand il se trouve un peu de vapeur dans l'air; marque 72° environ, quand l'air est près de moitié de saturation; puis la vapeur venant à augmenter, le cheveu ne s'allonge plus autant.

M. Regnault a facilité la formation de ces tables, en calculant de degré en degré de température (p. 179 de son mémoire) la tension des diverses combinaisons d'acide sulfurique et d'eau depuis 5° jusqu'à 35°. Nous répétons encore qu'il faut non-seulement graduer séparément chaque appareil, mais vérifier souvent sa graduation.

3e *Méthode*. — Hygromètre à condensation. — Le Roy de Montpellier a fait usage le premier de cette méthode, qui consiste à refroidir peu à peu l'eau d'un vase, jusqu'à ce que la vapeur, contenue dans l'atmos-

phère, commence à se précipiter sur les parois du vase, et à noter la température de l'eau et celle du verre à l'instant où la précipitation a lieu. Cette température indique celle à laquelle la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air sature l'espace. Supposons, par exemple, que la température ambiante de l'air soit de 15°; que la température de l'eau et de l'air, quand la vapeur se précipite, soit de 10°; si l'on considère les forces élastiques maximum à saturation F et f, lorsque l'espace est saturé à 15° et 10°, $\frac{f}{F}$ sera le degré hygrométrique ou l'humidité.

Cette méthode, telle que nous venons de la décrire, ne saurait donner des résultats précis, et n'a reçu d'application utile que depuis la construction de l'hygromètre de Daniel. L'appareil consiste en un tube en U, contenant de l'éther et vide d'air (pl. I, fig. 7); la boule A est en verre bleu, et B est également en verre, mais recouverte de linge; quand on verse de l'éther sur B, l'éther de l'intérieur de A s'évapore et vient se condenser dans la boule B; la température du thermomètre a s'abaisse, et lorsque la rosée commence à se déposer sur la boule A, la température du thermomètre (a) indique celle à laquelle l'air extérieur est saturé. Le thermomètre b donne la température de l'air ambiant, et le rapport des forces élastiques f et F, correspondant aux températures de a et de b, est la fraction de saturation ou l'humidité.

L'emploi de cet instrument est sujet à plusieurs causes d'erreur que nous devons indiquer : la présence de l'observateur près de l'appareil doit faire varier la quantité de vapeur contenue dans l'air. D'un autre côté, les températures des couches d'éther dans A ne sont pas partout les mêmes, et le thermomètre n'indique qu'une moyenne; il en résulte qu'en opérant ainsi et notant le point de rosée sur la boule A, la température baissant continuellement, à l'instant où l'on distingue la rosée sur A la température de a est trop basse; il faut donc aussitôt après opérer par échauffement, et prendre la moyenne des

deux observations. Autre inconvénient : quand la température est élevée et l'air très-sec, quelle que soit la quantité d'éther que l'on verse sur B, on ne peut pas avoir de point de rosée.

M. Regnault a modifié cet appareil, et a proposé l'instrument suivant, qui est à l'abri de ces causes d'erreur. Cet hygromètre se compose de deux tubes de verre, AB, A'B' (planche I, fig. 8), qui se terminent par deux réservoirs en argent BC, B'C'. Dans chacun de ces tubes plonge un thermomètre. Un petit tube recourbé *abc* peut amener l'air extérieur au fond de la cavité en argent BC, et à cet effet, l'extrémité du grand tube A est fermée avec un bouchon dans lequel passent le thermomètre *mn* et le tube *abc*; un tube de plomb aspirateur FE communique avec l'intérieur de AB. On voit donc que les deux tubes AB, A'B' sont identiques sous le rapport de la forme, à l'exception que dans AB on peut amener l'air extérieur au fond et le faire sortir par la partie supérieure. Les deux tubes AB, A'B' tiennent au même pied. On verse de l'éther dans AB, et à l'aide de l'aspirateur, qui se compose simplement d'un vase plein d'eau dont on peut modérer l'écoulement, on fait passer un courant d'air dans l'éther; l'éther se vaporise, la température de BC s'abaisse, et la rosée peut se déposer sur sa surface; le thermomètre *mn* donne donc la température du point de rosée et *m'n'*, placé dans les mêmes circonstances, donne la température de l'air ambiant. On peut, avec cet appareil, avoir un abaissement de température considérable, même pendant l'été. Une fois le point de rosée obtenu, il est facile, à l'aide d'un robinet modérateur, de maintenir ce point, de le faire disparaître et reparaître à volonté, et l'on peut répondre de sa température à $\frac{1}{10}$ de degré près; cette température étant connue, l'humidité s'en déduit d'après les tables.

4e *Méthode.*— Cette méthode, indiquée par M. Gay-Lussac, consiste à observer simultanément la température de deux thermomètres semblables, dont l'un est sec

et l'autre constamment humide; l'appareil composé de ces deux thermomètres a été appelé psychromètre. Lorsque le thermomètre humide est exposé à l'air non saturé, une portion de l'eau s'évapore, et la température baisse; le thermomètre sec reste stationnaire à la température de l'air.

M. August a donné la formule suivante, pour calculer la tension de la vapeur d'eau dans l'air :

$$x = f' - \frac{0{,}568\,(t - t')}{640 - t'}\,h,$$

x étant la force élastique de la vapeur d'eau au moment de l'expérience, c'est l'inconnue; t est la température extérieure marquée par le thermomètre sec; t' la température du thermomètre humide, et f' la force élastique de la vapeur saturée à la température t'. M. Regnault a changé quelques-uns des nombres relatifs à la dilatation et aux forces élastiques, et est arrivé à la formule

$$x = f' - \frac{0{,}429\,(t - t')}{610 - t'}\,h,$$

h étant la pression barométrique au moment de l'observation. Mais ces formules ne représentent pas rigoureusement la force élastique x de la vapeur d'eau trouvée directement par la méthode chimique, car la formule est indépendante de la vitesse du mouvement de l'air autour du psychromètre, tandis que l'abaissement de température ne l'est pas. De plus, la température des deux thermomètres dépend du rayonnement de l'enceinte où ils se trouvent et de circonstances dont il est très-difficile de tenir compte rigoureusement. Il vaut mieux admettre que la tension x est donnée par une fonction de la forme

$$x = \mathrm{A} - \frac{\mathrm{B}(t - t')}{\lambda}\,h,$$

A et B étant deux constantes et λ la chaleur latente de

la vapeur d'eau à la température t'. Alors des expériences faites dans un lieu déterminé donnent A et B, et à l'aide de la méthode chimique, on peut construire une table et connaître ainsi la tension x, puis le degré d'humidité. En opérant de cette manière, on a toujours trouvé des nombres un peu trop grands; néanmoins, les expériences ne sont pas encore assez nombreuses pour décider de l'exactitude de ce procédé.

On doit donc, quant à présent, s'en tenir aux trois premières méthodes, chacune d'elles pouvant rendre des services suivant les circonstances des observations.

§ II. — *Conditions hygrométriques de l'air, ou quantités diverses de vapeur d'eau contenues dans l'atmosphère.*

Variations diurnes. — On ne possède encore que peu d'observations sur la tension de la vapeur aux différentes heures de la journée et le degré d'humidité de l'air, cependant il existe quelques séries d'observations horaires faites avec l'hygromètre de Daniel ou le psychromètre. Nous parlerons dans ce paragraphe des observations faites à Halle par M. Kaemtz, aux diverses heures de la journée, dans les différents mois, et par chaque vent; ce sont, jusqu'à présent, à notre connaissance, les recherches les plus complètes sur la détermination des tensions de vapeur dans une même localité. Le tableau de la page suivante a été calculé à l'aide des observations faites avec l'hygromètre de Daniel; en regard de chaque heure, on a placé les tensions et l'humidité.

A l'inspection de ce tableau, on reconnaît que la tension de la vapeur d'eau ne reste pas la même aux différentes heures du jour et de la nuit. Le matin avant le lever du soleil, la quantité absolue de vapeur d'eau atteint son minimum; en même temps, en raison de l'abaissement de température, l'humidité atteint son maximum. A mesure que le soleil s'élève sur l'horizon, l'évaporation s'accélère, la tension de la vapeur augmente,

HEURES.	JANVIER.		FÉVRIER.		MARS.		AVRIL.		MAI.		JUIN.		JUILLET.		AOUT.		SEPTEMBRE.		OCTOBRE.		NOVEMBRE.		DÉCEMBRE.	
	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.	Tension.	Humidité.
	mm		mm		mm		mm		mm		mm		mm		mm		mm		mm		mm		mm	
Midi	4,29	82,8	4,69	74,7	5,34	69,9	6,15	59,7	7,04	57,8	10,36	59,9	11,62	55,7	10,77	54,2	9,96	61,3	8,27	69,3	5,93	80,9	5,64	84,1
1h	4,32	81,0	4,74	72,8	5,34	67,5	6,05	56,8	7,88	55,5	10,28	57,5	11,42	53,3	10,61	50,8	9,88	58,9	8,29	66,7	5,98	79,7	5,64	82,6
2	4,34	80,6	4,80	72,5	5,35	67,1	6,08	56,2	7,87	53,9	10,22	55,8	11,32	52,1	10,60	49,1	9,74	57,4	8,23	66,1	5,98	79,6	5,66	82,8
3	4,33	81,4	4,81	73,2	5,33	67,0	6,09	56,3	7,86	53,3	10,21	55,1	11,22	51,2	10,56	49,3	9,66	57,1	8,15	66,5	5,92	80,2	5,64	83,2
4	4,28	82,3	4,82	75,3	5,29	67,9	6,09	57,6	7,82	54,7	10,23	56,0	11,18	51,6	10,57	50,2	9,57	57,6	8,10	68,4	5,89	81,8	5,63	84,7
5	4,25	83,9	4,77	77,5	5,28	70,4	6,09	61,6	7,91	56,2	10,27	58,4	11,25	54,2	10,55	52,1	9,56	59,5	8,06	70,8	5,82	83,4	5,58	85,5
6	4,24	85,4	4,72	79,7	5,27	73,3	6,12	62,6	7,98	59,6	10,33	61,7	11,36	57,2	10,72	55,3	9,60	63,1	8,10	74,6	5,77	84,4	5,56	86,3
7	4,22	86,1	4,66	81,0	5,23	75,3	6,15	65,8	8,04	63,4	10,46	65,6	11,68	62,3	10,79	58,7	9,58	66,8	8,07	77,5	5,72	85,1	5,52	86,7
8	4,20	86,4	4,61	81,8	5,18	77,7	6,13	69,3	8,11	67,2	10,60	70,5	11,76	67,5	10,85	62,4	9,61	71,0	7,96	79,4	5,68	86,1	5,51	87,1
9	4,18	86,5	4,57	82,8	5,15	79,1	6,10	72,1	8,08	70,7	10,54	74,2	11,75	71,2	10,98	65,5	9,61	74,8	7,88	80,9	5,64	86,7	5,52	88,0
10	4,15	87,0	4,55	83,7	5,12	80,1	6,05	74,2	8,11	73,9	10,39	76,8	11,67	74,4	10,69	69,1	9,65	78,3	7,80	82,6	5,59	87,0	5,48	88,1
11	4,14	87,0	4,53	84,0	5,10	80,7	6,03	76,0	8,05	75,7	10,19	78,6	11,52	76,9	10,59	71,5	9,57	80,4	7,72	83,5	5,57	87,3	5,47	88,2
Minuit.	4,11	87,2	4,52	84,3	5,08	81,0	6,02	77,7	7,95	77,7	9,96	80,2	11,33	78,7	10,45	73,8	9,47	81,5	7,66	84,3	5,56	87,6	5,45	88,5
1h	4,09	87,4	4,50	84,6	5,06	81,5	5,99	79,3	7,81	79,8	9,76	81,5	11,15	80,2	10,31	76,0	9,33	82,2	7,59	85,1	5,55	87,9	5,45	88,6
2	4,09	87,7	4,48	84,9	5,03	82,4	5,93	81,0	7,69	82,0	9,65	82,9	11,05	81,8	10,22	78,3	9,16	83,0	7,52	85,8	5,54	88,2	5,44	88,6
3	4,08	88,0	4,45	85,3	4,99	83,5	5,88	82,7	7,61	83,7	9,65	84,3	11,07	83,0	10,22	80,5	9,03	84,1	7,43	86,7	5,53	88,5	5,44	88,6
4	4,08	88,3	4,40	85,7	4,96	84,7	5,84	84,2	7,61	84,6	9,81	85,2	11,21	84,0	10,33	82,2	8,99	85,3	7,36	87,4	5,52	88,8	5,42	88,6
5	4,07	88,6	4,36	86,0	4,94	85,6	5,87	85,0	7,70	84,2	9,99	84,9	11,44	83,3	10,55	82,8	9,05	86,1	7,34	87,9	5,51	89,1	5,40	88,7
6	4,06	88,8	4,33	86,3	4,94	85,5	5,96	84,6	7,83	82,3	10,16	82,9	11,68	82,6	10,79	81,9	9,21	85,3	7,44	87,8	5,50	89,4	5,40	88,8
7	4,06	88,9	4,33	86,2	4,98	84,7	6,08	82,1	7,78	78,8	10,45	79,9	11,96	79,0	11,07	78,7	9,44	83,8	7,49	86,7	5,52	89,1	5,38	88,7
8	4,05	88,3	4,34	84,3	5,06	82,9	6,25	78,8	8,17	73,8	10,43	74,2	12,11	74,0	11,33	74,1	9,76	80,3	7,75	84,8	5,56	88,1	5,35	88,4
9	4,07	86,0	4,41	82,2	5,15	76,6	6,34	73,3	8,19	66,8	10,48	69,9	12,05	68,2	11,33	68,6	10,00	74,9	8,66	81,6	5,65	87,9	5,37	87,7
10	4,12	85,4	4,50	79,2	5,24	75,9	6,35	68,9	8,11	64,7	10,41	65,3	11,89	63,1	11,15	62,9	10,04	69,1	8,23	77,2	5,77	84,5	5,48	86,5
11	4,21	83,9	4,62	76,8	5,29	72,1	6,28	64,3	8,06	61,2	10,32	61,8	11,72	58,9	10 ,7	57,8	9,97	64,5	8,28	72,8	5,86	82,4	5,58	85,1
Moyennes.	4,17	85,8	4,56	81,0	5,15	77,3	6,08	71,3	7,93	69,2	10,21	71,0	11,52	68,5	10,70	66,1	9,56	72,8	7,87	78,9	5,69	85,6	5,50	86,8

et cette augmentation a lieu jusqu'au moment où la température atteint son maximum; alors la tension est à son maximum vers une heure ou deux, et le degré d'humidité est à son minimum.

On reconnaît en outre que, dans les mois d'hiver, il n'y a que ce seul maximum et ce seul minimum pour les heures de la journée; mais en été, vers midi, il y a un second maximum de tension, et, entre ce maximum et l'autre, il existe un second minimum, qui est moins faible que celui du matin. La différence entre le maximum et le minimum de tension diurne ne s'élève pas à plus d'un millimètre de mercure.

Les localités exercent probablement une grande influence sur ces variations; pour savoir à quoi s'en tenir à cet égard, il faudrait un plus grand nombre d'observations que celles que l'on possède déjà. La hauteur des lieux où l'on observe intervient aussi dans les phénomènes. En effet, le matin, à mesure que le soleil s'élève sur l'horizon, le sol s'échauffe, et il existe un courant ascensionnel qui amène des vapeurs dans les régions supérieures; l'air devient donc plus sec qu'il ne le serait sans l'augmentation de température. Ainsi il peut arriver que, dans des régions élevées, l'air devienne plus humide dans le courant de la journée, et que la sécheresse augmente vers le soir, quand les vapeurs s'abaissent dans les plaines; dès lors, il doit exister une certaine hauteur où l'humidité relative est la même pendant les vingt-quatre heures, puisque, à la surface de la terre, c'est la nuit que l'air est le plus humide.

Il est très-important de noter ces causes d'humidité de l'air, car sur le bord de la mer il s'élève une brise de mer dans la journée, qui amène du large des vapeurs au moment où les courants ascendants auraient transporté ces vapeurs dans les régions supérieures.

Variations mensuelles. — La quantité de vapeur, qui varie avec les heures de la journée par l'action seule de la température, doit aussi varier suivant les mois et les saisons. Nous en donnerons pour exemples les résultats

obtenus dans la même localité que précédemment, et déduits en moyenne des différents mois :

Mois.	Tension de la vapeur d'eau.	Humidité.
Janvier	4,509 (minim.)	0,850
Février	4,749	0,799
Mars	5,107	0,764
Avril	6,247	0,714
Mai	7,836	0,691
Juin	10,843	0,697
Juillet	11,626 (maxim.)	0,665
Août	10,701	0,661 (minim.)
Septembre	9,560	0,728
Octobre	7,868	0,789
Novembre	5,644	0,853
Décembre	5,599	0,862 (maxim.)

Ainsi, la tension de la vapeur est, en hiver, moindre qu'en été, mais l'humidité est à son maximum, et *vice versa*.

A l'approche de l'hiver, la vapeur qui se précipite sous forme de pluie, de rosée, de gelée, etc., est plus considérable que celle qui passe à l'état de fluide élastique; sa quantité va en diminuant, mais l'humidité augmente et devient plus forte en novembre et en décembre qu'en janvier; de là les froids humides de novembre et décembre.

Dans l'Inde, suivant Princeps, il paraît qu'on observe une marche analogue dans la vapeur d'eau; seulement il y a une augmentation de la quantité de vapeur en juillet, et une diminution en janvier.

Jusqu'ici les déterminations manquent pour connaître les quantités de vapeur qui se trouvent en différents lieux de la terre; ces notions seraient importantes pour la climatologie, et pour la géographie des animaux et des plantes; on sait seulement qu'en général la quantité absolue de vapeur diminue de l'équateur aux pôles.

En pleine mer, la vapeur doit saturer l'air; mais,

comme l'eau est salée, la tension est un peu plus faible que celle de la vapeur émanée de l'eau pure à la même température. On exprime le même résultat en disant que la tension est la même que si l'eau de mer était pure, et que la température fût en chaque endroit un peu plus basse qu'elle n'est réellement.

Sur les côtes, l'humidité, à latitude égale, est plus grande que dans l'intérieur des continents, comme on l'observe en Amérique, en Afrique et à la Nouvelle-Hollande. Dans les déserts de l'Afrique, il n'y a aucune évaporation, et l'extrême chaleur qui s'oppose aux précipitations aqueuses rend ces déserts stériles.

Vapeurs à différentes hauteurs.—L'abaissement de température que l'on observe en s'élevant dans l'atmosphère suffit pour limiter la quantité de vapeur qui s'y trouve; à — 20°, par exemple, la tension de la vapeur étant seulement un peu plus forte que 1 millimètre de mercure, on doit à peine en trouver dans l'atmosphère à partir de cette température.

Il se présente ici une question importante à résoudre : l'humidité est-elle la même, en moyenne, dans les différentes couches d'air atmosphérique? Par exemple, à — 20°, à une certaine hauteur dans l'atmosphère, la tension F étant très-petite, il pourrait se faire qu'il n'y eût qu'une quantité de vapeur excessivement petite, dont la tension serait f, mais que le rapport $\frac{f}{F}$ fût le même qu'à la surface de la terre; c'est-à-dire que, bien qu'il y ait des quantités différentes de vapeur, l'humidité restât la même à diverses hauteurs.

De Saussure et, depuis lui, plusieurs physiciens ont admis que l'humidité diminuait à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère. De Saussure n'a choisi probablement, dans ses observations, que les jours de beau temps, car M. Kaemtz et d'autres météorologistes ont trouvé, au niveau de la mer et au sommet des montagnes, en moyenne, le même degré d'humidité; ainsi, d'après M. Kaemtz :

A Zurich, pendant 9 semaines, l'humidité a été de 0,746
Sur le Rigi, pendant le même temps........0,843

Après onze semaines d'observations, dans les mois d'août, septembre et octobre, on a trouvé pour le degré d'humidité :

A Zurich..............................0,748
Sur le Faulhorn.......................0,744

Mais on doit tenir compte des changements énormes dans l'humidité, qui ont lieu dans la région où se trouvent les nuages, et qui sont beaucoup plus fréquents qu'à la surface de la terre.

Quelquefois l'air est plus humide en haut qu'en bas, et réciproquement ; ainsi M. Kaemtz a observé :

En 1832	Humidité moyenne à Zurich.....	0,744
	Sur le Faulhorn..............	0,633
En 1833	Zurich......................	0,713
	Faulhorn....................	0,855

M. Gay-Lussac, dans son voyage aérostatique, a observé l'hygromètre de Saussure, depuis la surface du sol jusqu'à près de 7000 mètres; il a obtenu les résultats suivants :

TEMPÉRATURE	HAUTEUR au-dessus de Paris.	DEGRÉS des hygromètr.	TEMPÉRATURE	HAUTEUR au-dessus de Paris.	DEGRÉS des hygromètr.
	m.			m.	
27°,75	0	57°,5	5°,25	5001,8	30°,1
12 ,50	3332,0	62 ,0	4 ,25	5267,7	27 ,5
11 ,00	3412,1	50 ,0	2 , 5	5519,2	32 ,7
8 ,50	3691,3	37 ,3	0 , 5	5674,8	30 ,2
10 ,50	3816,8	33 ,0	1 , 0	5175,1	33 ,0
12 ,00	4264,7	30 ,9	—3 , 0	6040,7	32 ,4
11 ,00	4327,8	29 ,9	—1 , 5	6107,2	32 ,1
8 ,25	4725,9	27 ,6	0	5631,6	35 ,1
6 ,50	4808,7	27 ,5	—3 ,25	6143,3	33 ,9
8 ,75	4511,6	29 ,4	—7 , 0	6884,1	33 ,5

On voit que l'hygromètre a marché inégalement, qu'il a diminué jusqu'à 3000 mètres, mais qu'il s'est maintenu sensiblement entre les mêmes limites depuis 3700 mètres jusqu'à 7000 mètres.

Il résulte de ces faits que l'on doit considérer l'humidité comme variant peu, en moyenne, dans les couches atmosphériques où l'on a pu faire des observations. On se rend compte de cet effet de la manière suivante : la vapeur d'eau se formant dans l'air comme dans le vide, glisse entre les particules de gaz, et, en admettant que la loi du décroissement de la température ne fût pas changée, on pourrait supprimer l'atmosphère d'oxygène et d'azote sans que l'équilibre de l'atmosphère de vapeur d'eau fût détruit; alors rien ne s'oppose à ce que la formation continuelle de la vapeur à la surface de la terre ne fournisse la quantité nécessaire à toutes les hauteurs pour maintenir à peu près le même degré d'humidité; seulement, comme la tension augmente rapidement avec la température, il doit se produire constamment des précipitations locales, par suite du mélange des masses atmosphériques de températures différentes.

Les appareils n'indiquant que l'état de l'humidité dans le lieu où ils sont placés, il s'ensuit que les observations hygrométriques sont toujours soumises à beaucoup d'incertitudes; ainsi, un hygromètre peut indiquer une très-grande sécheresse, et l'air peut être très-humide à 50 ou 60 mètres au-dessus ou au-dessous. Il faut donc être très-circonspect quant aux déductions que l'on peut tirer des observations hygrométriques seules.

Il est aisé de se rendre compte de la quantité totale de vapeur d'eau qui est tenue continuellement en suspension dans l'atmosphère, et l'on verra que cette quantité est très-petite, eu égard à la masse totale des eaux qui couvrent le globe. Si l'on admet, pour le cas le plus défavorable, que toute la surface de la terre soit à 30° de température, que toute l'atmosphère soit saturée, et que le décroissement moyen de température soit de 1°

pour 172 mètres, alors on peut supposer l'atmosphère divisée en tranches d'air de 860 mètres chacune, et décroissant de 5° en 5°, depuis + 30° jusqu'à — 10°. Le poids de la vapeur contenue dans la première tranche supposée à la température de $\frac{30+25}{2}=27°,50$, la tension étant de $27^{mm},5$, est en colonne d'eau,

$$\frac{860.27,5}{760\,(1+0,00367.27,5)}\cdot\frac{13}{10000}\cdot\frac{5}{8}=0^{\text{mèt.}},028,$$

ou 28 millimètres d'eau. En cherchant ainsi de proche en proche le poids de la vapeur dans des tranches de même épaisseur, on trouve qu'à 6880 mètres de hauteur, la température étant — 10° et la tension de $2^{mm},1$ de mercure, ce poids est encore de $0^{mm},002$ d'eau. La somme de toutes les tranches, depuis la surface donne $0^{m},1$; ainsi, la quantité de vapeur, au-dessus de cette limite, ne dépassant pas sensiblement $0^{m},002$ d'eau, il en résulte que la quantité totale d'eau en vapeur dans l'atmosphère, à un instant quelconque, n'équivaut pas à un poids de 1 décimètre d'eau qui couvrirait tout le globe; car on est loin de l'état de saturation, et des circonstances de température que nous avons indiquées.

Humidité par différents vents. — Nous venons de voir quelle était l'humidité aux différentes heures de la journée dans un même lieu ; mais les vents troublent cet état, et, suivant les contrées d'où ils soufflent et les régions par lesquelles l'air a passé avant d'arriver dans la localité que l'on considère, ils sont accompagnés de plus ou moins d'humidité; ainsi, en France, le vent d'est est plus sec que le vent d'ouest, qui nous arrive de l'Océan. Pour trouver l'humidité moyenne, il faut chercher, comme nous l'avons indiqué, quelle est la direction moyenne du vent, pour un jour déterminé, et l'humidité correspondante. Nous citerons encore, comme exemples, les résultats obtenus par M. Kaemtz, à Halle, dans les diverses saisons et suivant les différents vents:

VENTS.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.
N.	0,895	0,750	0,676	0,787
N.-E.	0,912	0,723	0,674	0,826
E.	0,926	0,669	0,613	0,757
S.-E.	0,855	0,714	0,663	0,792
S.	0,830	0,703	0,674	0,762
S.-O.	0,819	0,703	0,699	0,786
O.	0,809	0,717	0,714	0,806
N.-O.	0,832	0,734	0,688	0,827

On doit remarquer que la température doit avoir une grande influence, car le vent du nord, quoique contenant moins d'eau que le vent du sud, est plus humide, à cause de sa basse température.

On déduit de ces résultats les conséquences suivantes, qui peuvent s'appliquer à l'Europe occidentale : en hiver, le vent d'est est humide, en été il est sec; l'inverse a lieu pour le vent d'ouest. Cette inversion provient de ce que, en hiver, le vent d'ouest est plus chaud que les autres vents. Il en est de même pour le vent d'est en été. Mais, par exemple, si, en hiver, le vent d'ouest a régné, et que, par un temps serein, le vent d'est ou nord-est, plus humide et plus froid, s'élève, le ciel se couvre alors et une partie de l'eau se condense à l'état de pluie ou de vapeur; le baromètre, pendant le même temps, peut rester haut. L'inverse a lieu quand le vent qui a soufflé de l'est passe à l'ouest : le ciel devient serein et sec. En été, c'est le contraire : on n'a qu'à remplacer le vent d'est par le vent d'ouest, et *vice versa*, pour donner lieu aux mêmes phénomènes; le baromètre peut alors rester haut et indiquer le beau temps.

Les matériaux que l'on possède sur ce sujet ne sont

pas encore très-nombreux, et il est nécessaire pour les étendre de multiplier les observations hygrométriques dans les différents observatoires où l'on s'occupe de météolorogie.

§ III. — *Condensation de la vapeur d'eau. — Météores aqueux.*

Lorsque l'air contient plus d'eau qu'il n'en faut pour saturer un espace donné, l'eau se précipite, et, suivant la température et la manière dont cette précipitation s'opère, il en résulte divers hydro-météores dont nous allons parler.

Rosée, serein, gelée blanche, givre.

Quand l'air qui est à la surface de la terre n'est pas tout à fait à saturation, si, par une cause quelconque, les corps viennent à se refroidir, alors, dans la couche gazeuse en contact avec eux, la saturation a lieu et la vapeur se précipite. Telle est la cause de la rosée et de la gelée blanche.

Rosée. — La rosée est due au rayonnement nocturne. Le docteur Wels est le premier qui ait montré, par des expériences concluantes, quelles étaient les causes de sa production. Lorsque le soleil est caché sous l'horizon, tous les corps qui se trouvent à la surface de la terre, la terre elle-même ainsi que l'air, ne reçoivent plus de rayons solaires; ils rayonnent alors à leur tour vers les espaces célestes et se refroidissent. Par conséquent, après le coucher du soleil, presque tous les corps qui ne sont pas abrités deviennent plus froids que l'air; quelques-uns ont 1°, 2°, 3°, et même, dans quelques cas, jusqu'à 12° au-dessous de la température ambiante. L'abaissement de température dépend du pouvoir rayonnant et de la conductibilité des corps pour la chaleur; lorsqu'il se manifeste, les couches d'air qui environnent ces corps participent au refroidissement, et la vapeur d'eau, ayant une tension plus forte que celle qui est nécessaire pour saturer l'espace à cette température, se précipite sous

la forme de gouttelettes. Il se produit un effet du même genre lorsque l'on transporte un verre contenant de l'eau froide dans l'intérieur d'un appartement humide à une température plus élevée : les parois de ce verre ne tardent pas à se recouvrir d'humidité. Du reste, on sait que les nuits à fortes rosées sont très-froides ; seulement il faut remarquer que le froid est cause de la formation de la rosée, et n'en est pas une conséquence.

D'après ce principe, la rosée est donc toujours plus forte dans les localités où les objets sont le plus exposés au rayonnement atmosphérique; en effet, si l'on intercepte la vue de la voûte céleste à un corps pendant la nuit, il ne se déposera que peu ou point de rosée. Si donc on place, comme l'a fait le docteur Wels, deux flocons de laine, l'un à l'air libre, par une nuit calme et sereine, l'autre sous une planche qui lui fasse écran par rapport au ciel, le premier flocon augmentera de poids, en raison de la précipitation de la rosée, tandis que le second n'aura que peu ou point augmenté.

C'est par la même raison que la rosée est plus abondante en rase campagne que dans les villes; et si le ciel est couvert de nuages, le dépôt de rosée pourra alors n'être point sensible, attendu que ces nuages faisant office d'écrans, s'opposent ainsi au rayonnement, et par suite à l'abaissement de température. Concluons de là que tout ce qui favorise le rayonnement favorise également la formation de la rosée.

L'inégalité de pouvoir rayonnant et de pouvoir conducteur, avons-nous dit, produit, pendant la nuit, des abaissements de température différents dans tous les corps situés à la surface de la terre. Quand l'air est très-humide, le point de rosée est voisin de la température ambiante, et tous les corps se couvrent de rosée; mais si l'air est plus sec, il n'y a que ceux qui rayonnent le plus dont la surface se recouvre d'eau. Toutes choses égales d'ailleurs, certains corps se recouvrent donc plutôt de rosée que d'autres; ainsi les plantes se mouillent plus que la terre, le sable plus qu'un sol

battu, le verre plus que les métaux, c'est-à-dire, les corps mauvais conducteurs et qui ont le plus grand pouvoir rayonnant se couvrent de rosée plus abondamment que les autres, attendu qu'une fois refroidis, ils conservent plus longtemps leur abaissement de température. La différence entre la température de l'herbe et celle de l'air est souvent de 4° à 8°.

La rosée se dépose non-seulement le matin et le soir, mais encore pendant toute la nuit, quand l'air est calme et le ciel serein. Les corps commencent à se refroidir avant le coucher du soleil, mais on n'aperçoit pas de dépôt de rosée avant que cet astre quitte l'horizon; toutes choses égales d'ailleurs, il se forme moins de rosée pendant la première moitié de la nuit que pendant la seconde; le matin, les gouttelettes de la nuit continuent encore à grossir quelque temps.

Sur les côtes, où l'air est très-humide, on observe de fortes rosées; dans l'intérieur des grands continents, en Afrique et en Asie, elles sont presque nulles. D'après les mêmes motifs, on conçoit que, plus les jours précédents auront été chauds, plus il y aura eu de vapeur dans l'air, et par conséquent plus abondant sera le dépôt de rosée. C'est pour cela que la rosée est plus abondante en été que dans les autres saisons, et qu'elle est nulle en hiver.

Le vent a aussi une influence sur le dépôt de rosée. S'il est faible, en renouvelant l'air il peut l'augmenter; s'il est fort, habituellement, il le diminue. D'après ce que nous avons vu, p. 117, comme la température de l'air pendant la nuit peut aller en augmentant jusqu'à une certaine hauteur, par suite du refroidissement qui se communique aux couches d'air inférieures, il en résulte qu'un vent léger peut aussi mélanger les couches d'air, et faire disparaître la rosée en amenant des masses gazeuses plus chaudes. Mais, en général, les conditions nécessaires à la formation de la rosée sont un air calme et un ciel serein.

Dans une saison froide, quand il souffle un vent

chaud, quelquefois les murs des maisons et les objets refroidis se recouvrent d'humidité; ce dépôt est tout à fait analogue à celui de la rosée.

On a évalué quelle était dans nos climats la quantité de rosée qui pouvait se déposer ainsi sur le sol; M. Flaugergues a trouvé qu'en moyenne, en un jour de rosée, il ne se déposait pas une couche d'eau de plus de $\frac{5}{100}$ de millimètre d'épaisseur. En un an il observa 125 rosées dont la somme totale avait donné un dépôt d'eau de $6^{mm},430$. (Gasparin, *Météorologie agricole*, t. II, p. 119.) A Florence, on a trouvé, depuis l'année 1800 jusqu'à 1801, et de 1808 à 1809, en moyenne, 87 rosées par an, donnant plus de 6 millimètres d'eau; cela équivalait à près de $\frac{7}{100}$ de millimètre par rosée. Dans les pays où l'air est très-humide, il n'est pas douteux que le dépôt ne soit plus considérable.

Gelée blanche ou givre. — La gelée blanche ou le givre se forme dans des circonstances tout à fait analogues à celles qui donnent naissance à la rosée, avec cette différence, toutefois, qu'il se produit de la neige ou de l'eau congelée, au lieu d'eau liquide. La gelée blanche ne se forme qu'en automne, en hiver et au printemps, car il faut que la terre soit suffisamment refroidie, ou du moins les corps qui se trouvent à sa surface, pour que l'eau puisse se congelér.

Les gelées d'automne et de printemps, qui nuisent tant aux plantes potagères et aux arbres fruitiers, sont dues non-seulement à la précipitation de gelée blanche, mais encore à la congélation de l'eau des plantes elles-mêmes, laquelle, en augmentant le volume de cette eau, détruit les tissus. On évite ces effets en les abritant du rayonnement céleste. Lorsque les corps se refroidissent ainsi, l'air plus dense, par suite de son refroidissement au contact de ces corps, descend vers la terre et produit des courants qui sont cause que la température ne s'abaisse pas autant que cela aurait lieu sans ce motif.

Nous citerons, comme une application du rayonnement atmosphérique, les glacières du Bengale, sous les

tropiques, dans lesquelles l'eau se congèle au milieu de terrines de grès, par son exposition seule au rayonnement nocturne. Dans ces contrées, la nuit, la température de l'air ambiant est presque toujours de plusieurs degrés au-dessus de zéro, mais le pouvoir rayonnant de l'eau, étant assez considérable, suffit pour amener ce liquide au point de congélation.

Serein. — On désigne ainsi une précipitation d'eau sous forme d'une pluie très-fine, que l'on observe dans nos climats, sans qu'il y ait apparence de nuage. Ce phénomène se produit en général dans les grandes chaleurs au coucher du soleil, surtout dans les vallées, les plaines basses, et à peu de distance des lacs et des rivières. Il est dû au refroidissement de couches de l'atmosphère peu élevées, qui contiennent alors plus d'eau qu'il n'en faut pour saturer l'espace après le coucher du soleil. Les petites gouttes d'eau ne peuvent s'évaporer en tombant, à cause de leur court trajet et de la saturation des couches inférieures.

DES BROUILLARDS ET DES NUAGES.

Formation des brouillards. — D'après la loi du mélange des gaz et des vapeurs, la vapeur d'eau se forme à la surface de la terre, comme si l'air n'existait pas, seulement avec beaucoup plus de lenteur; elle glisse donc entre les interstices des molécules d'oxygène et d'azote, pour s'élever à une certaine hauteur et former une atmosphère aqueuse. Si cette vapeur n'atteignait pas son changement d'état, les couches qu'elle forme se disposeraient par ordre de densité décroissante à partir de la surface de la terre, chaque couche supportant le poids des couches supérieures. Avec une température uniforme dans l'atmosphère, cet équilibre pourrait exister, et il ne pleuvrait pas; mais si la diminution de la température avec la hauteur atteint une limite telle, que le poids des couches de vapeur, qui ne peuvent dépasser l'état de saturation, ne puisse faire équilibre à la couche de vapeur sur laquelle elles reposent, alors la vapeur qui se forme à la surface

du globe tendra toujours à s'élever et à venir se condenser dans les régions supérieures, plus froides que celles qui les maintiendraient à l'état de saturation.

Le décroissement actuel de la température dans l'atmosphère, de 1° par 172 ou 180 mètres, est dans ce cas, car, par exemple, à 25°, la tension maximum de la vapeur d'eau est à peu près de 24 millimètres de mercure; or, on a vu plus haut que le poids total de la vapeur contenue dans l'atmosphère, en supposant la température de 25°, ou si l'on veut sous les tropiques, ne surpassait pas 1 décimètre d'eau, c'est-à-dire 7 millimètres de mercure; il résulte de là que la tension de la vapeur d'eau, à la surface du sol, ne sera jamais équilibrée par le poids de la vapeur contenue dans le reste de l'atmosphère. Ainsi, avec le décroissement actuel de température, il s'opère une espèce de distillation, et l'eau évaporée à la surface du globe vient se condenser à une certaine hauteur, où elle forme des nuages, et retombe ensuite à l'état de pluie ou de neige.

Nous avons supposé que, malgré le décroissement de température avec l'élévation, la surface de la terre était également chaude; mais une autre condition de la chute de l'eau est le décroissement de la température de l'équateur aux pôles, et le mélange des masses saturées ou humides qui se déplacent dans la direction des méridiens, et traversent des lieux inégalement échauffés. En outre, il y a des variations de température et des évaporations accidentelles qui changent la quantité de vapeur d'eau formée, et peuvent donner lieu à des précipitations locales plus ou moins abondantes.

En général, lorsque l'air contient une plus grande quantité de vapeur d'eau que celle qui est nécessaire pour sa saturation, soit par suite d'un abaissement de température, soit par toute autre cause, alors sa transparence est troublée, la vapeur d'eau se précipite, et il se forme du brouillard. Si le brouillard est suspendu à une certaine hauteur dans l'atmosphère, qu'il reste immobile ou qu'il soit emporté par des courants d'air en

formant des amas irréguliers, il prend alors le nom de nuage.

Les brouillards ou les nuages peuvent se former à la surface de la terre, ou bien à une certaine hauteur dans l'atmosphère.

A la surface de la terre, ils prennent habituellement naissance lorsque cette surface est plus chaude que l'air et que celui-ci est saturé d'humidité : dans ce cas, la tension de la vapeur qui s'élève est celle qui convient à la température de cette surface; mais bientôt la vapeur rencontrant l'air humide et plus froid, ne peut subsister dans cette région froide et se condense.

Un effet du même genre a lieu lorsque l'on met un vase plein d'eau chaude dans une atmosphère un peu humide : plus l'eau est chaude et l'air humide, plus on aperçoit de vapeurs au-dessus du vase.

Nous rapporterons un passage de Saussure, qui peint bien cette formation de brouillard (*Essai sur l'hygrométrie*, p. 310):

« Arrêté par un vent pluvieux sur la cime ou le pen-
« chant de quelque haute montagne, je cherchais à épier
« la formation des nuages que je voyais naître presqu'à
« chaque instant sur les forêts ou sur les prairies situées
« au-dessous de moi. Nul brouillard ne couvrait leur sur-
« face; l'air qui les environnait était parfaitement net et
« transparent; mais tout à coup, tantôt ici, tantôt là,
« il paraissait quelques-uns de ces nuages, sans que ja-
« mais je pusse saisir le commencement de la formation.
« Dans une place que mon œil venait de quitter, où
« deux secondes avant il n'en existait pas, j'en voyais
« tout à coup un déjà grand, du diamètre au moins de
« deux à trois toises. . . . . . Lorsque le temps allait au
« beau, ces nuages s'élevaient, diminuaient en montant,
« et se dissolvaient entièrement dans l'air. Si, au con-
« traire, le temps se disposait à la pluie, ils augmentaient
« de volume, tantôt à la même place, tantôt en montant
« quelquefois en descendant le long de la montagne. »

Dans l'atmosphère, les nuages ou les brouillards peu-

vent prendre naissance soit par le mélange de deux masses d'air saturées, d'inégale température, soit par des condensations de vapeurs qui s'élèvent dans des régions trop froides pour les maintenir à l'état de fluide élastique.

Dans le premier cas, il est facile de prouver qu'il y a toujours condensation d'une partie de la vapeur. Si par exemple, de l'air, saturé à 10°, se mêle avec de l'air saturé à 20°, la température moyenne sera de 15°. D'un autre côté, la force élastique maximum de la vapeur saturée à 15° est $13^{mm},4$; or ce nombre est moins considérable que la moyenne des deux forces élastiques maxima à 10° et à 20° : en effet, à 10° on a $9^{mm},9$, et à 20°, $18^{mm},2$; ce qui donne pour la moyenne,

$$\frac{18,2 + 9,9}{2} = 14^{mm},1.$$

Toute la vapeur qui produit la différence des forces élastiques 14,1 et 13,4, ou $0^{mm},7$, doit se précipiter. Ainsi deux masses d'air saturées inégalement chaudes donnent toujours lieu à une précipitation de vapeur.

Les brouillards apparaissent habituellement le matin et le soir; le soir ils peuvent se répandre plus ou moins loin, mais le matin ils sont situés en général au-dessus des rivières et des lacs. Ils sont dus au rayonnement vers les espaces célestes, c'est-à-dire au refroidissement inégal du sol ou de l'eau, et de l'atmosphère. Lorsque le soleil n'échauffe plus le sol, là où l'eau abonde, les courants descendants qui se manifestent dans la masse de ce liquide par suite de l'abaissement de la température, maintiennent la surface à une température plus élevée que celle du sol où ces effets n'ont pas lieu; il résulte de là qu'au-dessus de l'eau se trouve de l'air saturé à une température plus élevée que celle de l'air des régions environnantes; si donc, par une cause quelconque, ces masses gazeuses viennent à se mélanger, il se produit immédiatement une précipitation de vapeur.

C'est encore par suite d'une plus haute élévation de température de l'air saturé que celle de la surface de l'eau, que l'on aperçoit quelquefois des brouillards très-intenses au-dessus des rivières, même quand elles sont couvertes de glace. Les brouillards qui apparaissent après une pluie d'orage sont dus à la même cause.

Comme exemple de la différence des effets que produit le rayonnement pour opérer la condensation des vapeurs, selon qu'il émane d'une surface terreuse ou aqueuse, nous rappellerons que M. de Humboldt, en parlant de l'île de Roques, dit que c'est un phénomène bien extraordinaire de voir l'influence exercée par cette petite masse de terre sur la condensation des vapeurs situées à 1600 mètres de hauteur. Il a observé un effet analogue lorsque la pluie était limitée par des bancs sous-marins; on doit se souvenir en effet que, sur les bas-fonds, la température étant plus basse qu'en pleine mer, la condensation des vapeurs de l'atmosphère presque saturée doit s'opérer au-dessus de ces localités.

Les brumes des mers polaires sont également attribuées à la condensation de la vapeur d'eau. On a aussi donné le nom de brouillard à un mélange de précipitations aqueuses et de fumée, ou à des particules carbonacées qui s'élèvent au-dessus des grandes villes, et qui s'abaissent ensuite, surtout lorsque l'air est très-humide et que les particules de fumée peuvent condenser assez d'humidité pour devenir plus pesantes que l'air. Ces brouillards renferment en général de l'acide pyroligneux qui irrite les yeux.

On nomme encore brouillards secs, des nuées de sable ou de poussière, et des précipitations aqueuses mélangées de particules solides qui subsistent souvent pendant un laps de temps très-long sans se dissiper. Nous en parlerons en traitant des phénomènes météoriques dont l'orgine n'est pas bien connue.

Vésicules des brouillards, leur suspension dans l'air. — Avant d'indiquer les principales formes que prennent les brouillards et les nuages, il est nécessaire de dire quel-

ques mots de l'état dans lequel se trouve cette précipitation de vapeur aqueuse, et comment elle peut se maintenir en équilibre dans l'atmosphère. Les opinions des météorologistes ne sont pas les mêmes à cet égard : les uns prétendent que, lors de la condensation, il se forme immédiatement de petites gouttes d'eau sphériques, qui augmentent peu à peu de dimension par leur réunion mutuelle, et finissent, dans le cas de la pluie, par donner lieu à des sphères liquides plus grosses; les autres admettent que l'eau, en se condensant, ne forme pas des petites sphères liquides pleines, mais bien des sphères creuses pleines d'air, appelées *vésicules de vapeur* ou *vésicules de brouillard*.

Cette dernière opinion, émise par Halley, a été adoptée par de Saussure. En examinant à la loupe, comme l'a fait ce météorologiste, la vapeur qui s'élève d'un vase de porcelaine contenant de l'eau chaude noircie, on voit des globules de grosseur variée s'élever au-dessus du liquide et traverser rapidement le champ de la vision; d'autres retombent immédiatement : ceux-ci paraissent des gouttelettes pleines. De Saussure, en explorant de la même manière un brouillard, et plaçant un corps noir derrière la loupe, a aperçu des sphérules semblables à celles qui s'élèvent de l'eau bouillante; les unes traversaient rapidement le champ de la vision, les autres rebondissaient sur l'écran noir. Enfin il paraîtrait que M. Kratzenstein, en examinant les sphérules qui s'élèvent de l'eau chaude, a observé à leur surface des couleurs qu'il a comparées à celles des lames minces.

On ne sait pas au juste quelle est la constitution de ces sphérules, et les preuves que l'on a données jusqu'ici de leur ressemblance avec les bulles de savon très-petites, ne sont pas à l'abri de toute objection; mais on peut continuer à les appeler globules des brouillards ou vésicules des brouillards, sans décider si elles sont pleines ou creuses.

De Saussure (*Essai sur l'hygrométrie*, p. 288) a fait des tentatives pour mesurer le diamètre des sphérules

du brouillard, à l'aide du microscope; il a assigné aux plus petites des vésicules un diamètre de $0^{mm},0059$, et aux plus grosses le double, ou $0^{mm},0118$; elles ont donc à peu près $\frac{1}{100}$ de millimètre de diamètre. Quant à Kratzenstein, son évaluation s'écarte un peu de celle-là; mais aussi sa méthode de comparaison avec la grosseur d'un cheveu est plus défectueuse. Seulement, dans la supposition où ces sphérules seraient creuses, par les teintes des lames minces et d'après les expériences de Newton, il a évalué à $\frac{1}{50000}$ de pouce anglais, c'est-à-dire, à $0^{mm},0005$, ou environ un demi-millième de millimètre, l'épaisseur de la paroi aqueuse de la vésicule de vapeur.

M. Kaemtz a calculé les épaisseurs des globules d'eau des nuages d'après le phénomène des couronnes que l'on observe lorsque l'on voit le soleil ou la lune à travers un nuage de peu d'épaisseur; nous décrirons plus tard ce phénomène, qui est un effet de diffraction, et dans l'Appendice nous indiquerons la méthode de calcul; nous dirons seulement ici que M. Kaemtz a trouvé, par ce procédé, que le diamètre est en moyenne $0^{mm},0224$. Il a reconnu que, dans les différents mois de l'année, le diamètre change, de manière à être plus petit en été qu'en hiver; le maximum a lieu en décembre, et alors le diamètre moyen est $0^{mm},035$, et le minimum en mai, où il est $0^{mm},0156$. Ce diamètre change aussi dans le même mois; il est plus petit quand le temps est beau, et plus grand quand le temps est à la pluie; enfin il est fort inégal dans un même nuage.

Il se présente ici une question importante à résoudre: que les sphérules de brouillard soient creuses ou pleines, quelle est la cause de leur suspension dans l'air? Pourquoi les brouillards stationnent-ils pendant un certain temps à la même place, et pourquoi les nuages ne tombent-ils pas?

Il ne faut pas croire que les nuages, même ceux qui paraissent immobiles, soient des masses de vapeur stationnaires; en examinant attentivement leurs contours, on les voit se modifier rapidement, ce qui indique un

mouvement intérieur dans les parties constituantes. Si l'on se rend compte du mode de formation du nuage qui paraît stationnaire, on voit qu'entre la terre et le nuage, la vapeur d'eau n'est pas à l'état de saturation, tandis que la base de ce nuage indique la limite où les masses atmosphériques commencent à être saturées; le nuage, semblable à un immense parachute, étant composé de particules plus pesantes que l'air, tend à descendre dans les régions inférieures, avec lenteur il est vrai, à cause de la résistance de l'air; mais aussitôt que sa base a dépassé la première limite, les sphérules aqueuses, se trouvant dans une atmosphère non saturée et plus chaude, se résolvent en vapeur, de sorte que la partie inférieure disparaissant graduellement, le nuage semble immobile. La vapeur augmentant de tension au-dessous du nuage, et n'étant pas à son maximum de saturation, remonte pour se liquéfier de nouveau; il y a là une espèce d'équilibre mobile, et l'ensemble du nuage, représentant une portion de l'atmosphère saturée de vapeur, reste stationnaire.

Les nuages qui paraissent quelquefois des journées entières, attachés aux sommets de quelques montagnes, sont un exemple de cet équilibre mobile. En effet, cette apparition qui persiste assez longtemps et qui fait croire à l'immobilité du nuage, n'est qu'apparente, car souvent les vapeurs sont condensées à mesure qu'elles s'élèvent le long des montagnes; mais lorsque ces vapeurs s'éloignent du sommet, entraînées par un vent quelconque, elles se dissipent. Le nuage qui semble stationnaire se forme donc continuellement par de nouvelles condensations, et se dissipe continuellement, étant entraîné par les vents.

Il faut, du reste, faire attention que les mouvements ascendants des masses d'air, ainsi que les vents, contribuent à soutenir les sphérules aqueuses et agissent sur elles comme sur des poussières légères en suspension dans l'air, et même comme sur du sable qui est quelquefois transporté à des distances considérables. Pour montrer entre

quelles limites sont comprises ces actions mécaniques, il est nécessaire de calculer l'effet de la résistance de l'air sur ces petites sphérules. Nous avons dit qu'en moyenne on pouvait admettre $\frac{2}{100}$ de millimètre pour leur diamètre. Si l'on suppose le cas le plus défavorable, celui où elles sont pleines, à la température de 4° leur poids serait de 42 dix-millioniémes de milligramme. Or, d'après les nombres rapportés dans l'Appendice, l'effet de la résistance de l'air peut être évalué au maximum à 0^g,013 sur 1 centimètre carré de surface, animé d'une vitesse de 1 mètre par seconde; dans le cas où l'on supposerait que cette action ne s'opérât que sur la section de la gouttelette, pour que cette résistance fût égale au poids, il faudrait que la molécule eût une vitesse de 0^m,32 ou de 3 décimètres par seconde à peu près. Un courant d'air ascensionnel de cette énergie maintiendrait donc un nuage immobile toutes choses égales d'ailleurs, et un vent horizontal aussi peu fort pourrait le déplacer. Mais en outre, en supposant que la sphérule aqueuse de 0^mm,02 de diamètre tombât, elle prendrait un mouvement uniforme, par suite de la résistance de l'air qui ne dépasserait pas 3^déc.,2, à moins qu'elle n'augmentât de volume dans sa chute, auquel cas sa vitesse croîtrait, et elle tomberait à la fin comme les gouttes de pluie.

Il est certain que si l'on se rend compte de l'immobilité des nuages qui stationnent au-dessus des montagnes, et des masses aqueuses condensées ou gelées qui sont emportées par les vents, on conçoit plus difficilement la suspension des brouillards et des brumes qui stationnent à la surface du globe pendant un temps plus ou moins long; car on ne peut admettre un équilibre mobile intérieur, analogue à celui que l'on invoque pour expliquer la suspension d'un nuage, et supposer que la vapeur, se reformant continuellement, vient se condenser dans les parties refroidies et remplacer celle qui se dépose lentement.

Fresnel, en supposant les sphérules creuses, pensait que l'action des rayons solaires pouvait transformer les

nuages en des espèces de mongolfières, qui s'élèveraient d'autant plus que la chaleur solaire serait plus considérable; mais comme l'état moléculaire des sphérules de brouillard est inconnu, on ne sait pas si cette cause a une influence sur la production du phénomène.

Nous ne devons pas oublier de mentionner l'opinion de Laplace à ce sujet, d'après laquelle les particules des corps, amenés à un état de division extrême, devraient éprouver des forces répulsives analogues à celles qui existent entre les molécules des substances que la chaleur a dilatées assez pour les amener à l'état de vapeur. Voici les expressions de l'auteur de la *Mécanique céleste* (t. V, p. 111) : « Ne peut-on pas admettre avec vraisemblance que le calorique des molécules aériennes exerce « sur le calorique des molécules d'un corps réduit en « parties très-fines, une force répulsive d'autant plus « grande que ces molécules se rapprochent plus de la « ténuité des particules de l'air, ce qui doit contribuer « à soulever ces parties et à les maintenir pendant long- « temps dans l'atmosphère? N'est-ce pas ainsi que les « vapeurs vésiculaires, qui forment les nuages, s'y main- « tiennent suspendues ? »

Ces explications, comme on le voit, laissent encore beaucoup à désirer; mais il est probable, comme on l'a vu plus haut, que l'immobilité d'une réunion de sphérules aqueuses n'est souvent qu'apparente.

Forme des nuages. — Tous les brouillards ne deviennent pas des nuages, quelquefois ils se dissipent dans les localités où ils se sont formés et ne sont pas emportés par les vents; mais l'origine de tout nuage est un brouillard. Ainsi un nuage, pour l'habitant des plaines, peut être un brouillard pour un observateur placé sur une montagne; cependant, comme nous allons le voir, il existe des nuages dans lesquels les particules, au lieu d'être à l'état liquide, sont à l'état solide.

Pour remonter jusqu'à un certain point à la cause de la formation des différents nuages, amas de vapeur ou de glace, et à celles qui déterminent leurs formes et

leurs couleurs si variées, il est nécessaire de les classer suivant les apparences les plus fréquentes qu'ils présentent. Nous suivrons la classification des nuages donnée par Howard en 1803, dans l'introduction de son ouvrage sur le climat de Londres. Cette classification a été adoptée par tous les météorologistes.

On admet trois formes principales distinctes de nuages, mais un même nuage peut subir une modification d'un de ces trois ordres ou rester dans un état intermédiaire, tenant de l'une ou de l'autre; il peut disparaître ou retourner à la première forme. Ces formes sont celles qui constituent les nuages dont les noms suivent :

1° *cirrus;* 2° *cumulus;* 3° *stratus.*

Les modifications intermédiaires ou composées, sont : les *cirro-cumulus, cirro-stratus, cumulo-stratus* et *strato-cumulus*, enfin le *cirro-cumulo-stratus* ou *nimbus* (nuage de pluie).

Howard a proposé de les annoter dans les registres météorologiques de la manière suivante, par des traits ou des signes :

Cirrus........ ╲

Cumulus...... ∩

Stratus....... ├┤

alors les modifications intermédiaires seraient indiquées par l'assemblage de ces signes; le *nimbus*, par exemple, serait représenté par ╲∩├┤.

Nous allons successivement passer en revue ces diverses formes de nuages, et évaluer les hauteurs où se trouvent dans l'atmosphère ces masses de brouillard.

Cirrus. — Les cirrus sont des petits nuages blanchâtres, composés de filaments déliés, qui leur donnent l'apparence d'un réseau délié ou de laine cardée; ils sont formés de filets parallèles, pouvant s'étendre dans une ou plusieurs directions par accroissement. Après une période de beau temps, lorsque le baromètre commence à baisser len-

tement, ces nuages commencent à se montrer et leur blancheur contraste avec le bleu du ciel. Ils ont en général une tendance à se disposer en longues bandes parallèles, à peine visibles; la cause qui les dirige s'étend donc à une grande distance. Par un effet de perspective, toutes ces bandes semblent converger vers un point, lequel indique l'orientation. Leur marche, parallèle à leur direction, contribue à les faire paraître immobiles en apparence.

Les observations de plusieurs météorologistes s'accordent pour donner la direction N., S. ou N.-E., S.-O. à ces bandes parallèles. Vers le nord, d'après les registres de l'expédition française, les bandes s'approchent un peu de la direction O., car l'orientation a été O. 1/4 S.-O., E. 1/4 N.-E; à l'équateur, M. de Humboldt a trouvé aux cirrus l'orientation moyenne N., S. Il est probable que cette direction tient à ce que ces nuages proviennent du mélange des masses d'air du S. ou S.-O. avec les masses d'air plus froides qui se trouvent dans les parties supérieures de l'atmosphère.

Les cirrus sont les nuages les plus élevés. M. Gay-Lussac, lors de son ascension aérostatique, parvenu à plus de 7000 mètres au-dessus du niveau de la mer, vit encore au-dessus de lui des nuages, qui n'étaient autres que des cirrus, paraissant situés à une distance considérable. Les voyageurs, en faisant l'ascension des plus hautes montagnes, ont toujours vu ces nuages au-dessus d'eux, et au sommet ils leur semblaient même aussi élevés que du pied de la montagne; il est difficile, d'après cela, de leur assigner des limites supérieure et inférieure. Les cirrus, vu la basse température des régions où ils sont situés, ne sont pas formés de vapeur vésiculaire, mais bien de particules glacées ou de flocons de neige; c'est à leur présence que sont dus les halos et les parhélies, qui, d'après ce que nous verrons, exigent pour leur formation des cristaux de glace.

L'apparition des cirrus précède souvent un changement de temps : en été, d'après M. Dove, ils annoncent

la pluie; en hiver, la gelée ou le dégel. On les a regardés comme pronostic de vent. Dans un beau temps, d'après Howard, avec une brise légère il y a toujours de petits groupes de cirrus qui viennent fréquemment du côté opposé au vent et qui s'accroissent dans le sens du vent; de forts vents sont toujours précédés de ces nuages dans leur direction; avant les orages, ils paraissent plus épais, et cela dans la partie opposée à celle de l'orage.

Lorsque, dans nos climats, le vent du S.-O. devient dominant et se fait sentir également dans les régions inférieures de l'atmosphère, les cirrus s'épaississent et deviennent grisâtres; ils se présentent d'abord sous la forme de laine cardée, puis s'abaissent vers la terre; la neige fond, et il se forme de la vapeur vésiculaire, qui ne tarde pas à se transformer en pluie.

Quelquefois des circonstances analogues transforment les cirrus en petits nuages arrondis, appelés nuages moutonnés; ce sont des cirro-cumulus. Ces nuages, formés de vapeurs vésiculaires, sont très-transparents, et lorsqu'on voit au travers le soleil ou la lune, au lieu de halos, il se produit des couronnes. On les considère comme un présage de chaleur; ils sont dus, de même que les cirrus, au mélange des vents chauds du sud avec les masses d'air plus froides des parties supérieures de l'atmosphère. Un temps humide, d'après Howard, est accompagné de ces nuages qui se transforment rapidement en cirro-stratus.

Cumulus. — Les cumulus sont des nuages arrondis, ressemblant à des montagnes entassées les unes sur les autres, nuages qui s'accroissent par en haut à partir d'une base horizontale. Ils se forment le matin et se dissipent habituellement le soir, mais ils partagent en général les vicissitudes de l'atmosphère; ils sont plus fréquents en été qu'en hiver. Leur formation dépend du mouvement ascendant de la vapeur d'eau pendant le jour, laquelle vient se condenser dans les régions plus élevées; d'après cela, quand l'air est humide et le ciel serein, on

les voit se former vers huit heures du matin; ils augmentent jusqu'à midi, puis diminuent vers le coucher du soleil. Le matin, ces nuages sont peu élevés; dans la journée, ils s'élèvent davantage; et le soir, ils se tiennent plus bas; ainsi, dans les montagnes, des voyageurs ont pu observer des nuages sous leurs pieds le matin, autour d'eux à midi ou une heure, au-dessus de leur tête dans la journée, et voir redescendre la limite inférieure des nuages vers le soir. Les cumulus, souvent, au lieu de se dissiper le soir, deviennent plus denses, et leur forme se rapproche de celle des stratus; ce changement dépendant de l'humidité de l'atmosphère, on doit s'attendre alors à des pluies ou à des orages.

M. de Saussure attribue la forme arrondie des cumulus aux colonnes d'air chaud ascendantes, dont les contours se dessinent dans l'atmosphère, car leurs apparences ne sont que des sections de cylindres. Si l'on ajoute à cela des petits tourbillons sur les bords, les formes arrondies prennent l'aspect des tourbillons de fumée qui s'échappent d'une cheminée.

Nous avons dit que les cumulus proprement dits se forment le jour et disparaissent la nuit : si l'air inférieur est trop humide, alors le ciel peut se couvrir complétement vers midi; mais les nuages passent de nouveau vers le soir à l'état de vapeur invisible. Suivant Howard, la formation de larges cumulus, du côté opposé au vent, quand il en fait beaucoup, indique l'approche du calme ou de la pluie.

Les cumulus sont quelquefois très-haut, mais jamais aussi haut que les cirrus. On a mesuré les hauteurs d'un grand nombre de nuages; voici quelques déterminations qui se rapportent surtout aux cumulus et à leurs modifications. Les limites d'élévation, d'après Bouguer, de Humboldt, etc., sont 400 à 6500 mètres. Dans la campagne de *la Vénus*, on a trouvé pour extrêmes 900 mètres et 1600 mètres. MM. Peytier et Hossard ont déterminé aussi quelques élévations de nuages, d'après les pics auxquels les parties supérieures et inférieures de ces nuages étaient

tangentes ; ils ont trouvé pour limite inférieure 450 et 2500 mètres, et pour limite supérieure 900 mètres et 3000 mètres. Dans une circonstance, ils étaient placés de manière à voir en même temps les deux surfaces d'un nuage ; ils lui ont trouvé, le premier jour, une épaisseur de 450 mètres, et le second jour, de 850 mètres.

Il n'est pas question, dans ces déterminations, des nuages orageux, dont il sera fait mention dans un chapitre à part.

Stratus. — On appelle ainsi des couches nuageuses horizontales très-larges, continues, s'accroissant de bas en haut. Ce sont les brouillards s'étendant en une vaste couche dans les matinées calmes, et dont la condensation apparente augmente encore par un effet de perspective.

Ils se forment habituellement au coucher du soleil, et disparaissent à son lever. En général, ils ne durent que la nuit ; au retour du soleil, la base prend la forme d'un cumulus qui s'élève et s'évapore ; ce changement peut être considéré comme pronostic de beau temps. Par rapport aux cumulus, qui peuvent être regardés comme nuages de jour, les stratus peuvent être considérés comme des nuages de nuit.

Les stratus sont fréquents en automne, et au printemps on les voit rarement se former. Ces nuages sont situés plus près de terre que les autres.

Nous avons représenté, dans la planche VI, les trois espèces principales de nuages. La légende placée à côté du dessin indique à quelles formes correspondent les diverses figures.

Les modifications des nuages, intermédiaires ou composées, se produisent dans beaucoup de circonstances, et souvent il est très-difficile de distinguer à quelle forme elles appartiennent. Howard fait les réflexions suivantes à ce sujet :

Lorsque les cirrus restent stationnaires, ils passent habituellement à l'état de *cirro-cumulus* ou de *cirro-stratus*. Le cirro-cumulus est fréquent dans l'été, et accompagne un temps chaud et sec ; on le voit rarement dans

l'hiver. Le cirro-stratus est épais au milieu et aminci aux extrémités; il précède le vent et la pluie, dont l'approche peut être prédite quand les nuages de cette espèce sont plus ou moins nombreux; on le voit presque toujours dans les intervalles des orages.

L'horizon souvent paraît chargé de nuages de tous côtés, cependant on n'observe au zénith que quelques cumulus épars et le ciel ne se couvre pas; cela provient d'un effet de perspective tel, qu'à mesure que les nuages isolés s'approchent de l'horizon, leur intervalle diminue, de sorte qu'à l'horizon même ils paraissent se toucher.

On vient de voir, page 388, que souvent les cumulus s'épaississent pendant le jour ou pendant la nuit, suivant l'humidité; mais, d'après M. Kaemtz, on doit distinguer, lors de ces modifications, les *cumulo-stratus* des *strato-cumulus*. Si l'air est très-humide, les cumulus augmentent en intensité pendant la journée, s'étendent et ressemblent aux stratus : ce sont les *cumulo-stratus;* le ciel se couvre alors tout-à-fait, la pluie peut tomber vers midi et cesser le soir. Si des masses nuageuses, denses, étendues, à bords circonscrits, augmentent le soir et couvrent le ciel pendant la nuit, il se forme alors des *strato-cumulus :* ces nuages peuvent donner de la pluie le matin, puis se dissiper vers midi. Les strato-cumulus ont de l'analogie avec les stratus par leur extension, mais leur formation n'a pas lieu à la même heure, ni de la même manière que les cumulus; ceux-ci sont formés pendant la chaleur du jour, tandis que les strato-cumulus se dissipent sous l'action des rayons solaires. Pendant l'hiver, ces espèces de stratus couvrent quelquefois le ciel pendant des semaines entières, et leur présence tient peut-être au décroissement rapide de la température à partir du sol; mais vers midi les vapeurs s'élèvent et des cumulus se forment.

Quelquefois il existe plusieurs étages de nuages, chaque couche étant toujours alignée par sa partie inferieure, de manière à marquer par une surface qui paraît à peu

près plane la limite de la partie de l'atmosphère où l'air est saturé de celle où il ne l'est pas. Il est possible que les rayons calorifiques, absorbés par la première couche de nuages, produisent une évaporation donnant naissance à la deuxième couche, comme la première elle-même est due à l'évaporation du sol; mais, en général, ces couches nuageuses sont dues aux vents inégalement chauds et humides qui règnent à diverses hauteurs dans des directions différentes.

Quant au nuage de pluie ou *nimbus*, Howard l'a nommé *cirro-cumulo-stratus*, pour indiquer le mélange ou plutôt l'absence de toute forme.

Nous ne devons pas oublier de mentionner ici l'opinion de Howard sur l'origine de la forme des nuages, opinion partagée depuis par quelques personnes. Ce météorologiste considère les cirrus comme des conducteurs électriques imparfaits, qui servent de communication entre deux masses électrisées; il attribue leur forme allongée aux effets qui se produisent dans cette circonstance. Il pense que les cumulus sont des conducteurs chargés d'électricité, et que leur forme arrondie est due à cette circonstance.

On a soin, dans les observatoires météorologiques, de noter l'aspect du ciel au moment des diverses observations de la journée; on indique si le ciel est couvert, à moitié couvert, etc.; cet examen est de quelque intérêt, le climat d'un pays pouvant être modifié et rendu plus uniforme par la présence de vapeurs : l'Angleterre, comme nous l'avons vu, en est un exemple. Pour tenir compte de la partie du ciel couverte de nuages, on peut, comme l'a fait M. Cacciatore, supposer le ciel partagé en segments, et estimer ainsi approximativement la surface nuageuse qui couvre chaque segment; alors le produit de cette surface par une épaisseur dépendant de l'intensité de la teinte plus ou moins sombre des nuages, donne une évaluation approchée de leur masse. (Voyez *Météorologie agricole* de M. de Gasparin, tome II, page 128.)

De la pluie, de la neige et du grésil.

De la pluie. — D'après ce qui a été dit relativement à la suspension des nuages, il est probable que les sphérules de brouillard tombent continuellement, à moins qu'elles ne soient emportées par les vents. Lorsque, par leur réunion, elles peuvent faire un trajet assez long avant de se réduire en vapeur, on aperçoit des bandes grises qui tiennent aux nuages et n'atteignent pas le sol; mais lorsque par leur agglomération, provenant de leur rencontre ou d'autres causes qui sont encore inconnues, elles peuvent acquérir une masse capable de les faire tomber sans qu'elles se vaporisent en route, alors elles donnent de la pluie qui tombe sur le sol. Si la condensation se fait lentement, comme cela arrive dans certains brouillards, la pluie qui se forme est très-fine et se nomme *bruine;* si la condensation est plus rapide, les gouttes acquièrent plus de grosseur. Quand la pluie traverse des couches d'air saturées, les gouttes peuvent s'accroître en tombant, parce qu'elles proviennent d'une région plus froide, et qu'elles pénètrent dans une région plus chaude; alors, il doit tomber plus d'eau sur le sol qu'à une certaine hauteur. La soudaineté de la chute de la pluie qui a lieu quelquefois, fait croire que l'on ne connaît pas toutes les causes productrices de cette agglomération de sphérules aqueuses.

Pour évaluer la quantité d'eau qui tombe dans les diverses localités, soit à l'état de pluie, soit à l'état de neige, on fait usage d'appareils que l'on a nommés pluvimètres, udomètres, hyetomètres ou ombromètres. Ils se composent simplement de vases ouverts par en haut, placés dans un lieu découvert, de manière à recevoir directement la pluie ou la neige et à les soustraire à l'évaporation; on mesure ensuite l'eau tombée dans le vase. Quand on dit qu'il est tombé 50 centimètres d'eau dans une année, cela signifie que si l'on empêchait l'évaporation, et que l'on supposât l'eau étendue sur toute la surface du lieu où elle est tombée, l'épaisseur de la couche

serait de 50 centimètres. On peut voir la description de l'udomètre de l'Observatoire de Paris, dans le *Traité de physique* de M. Pouillet, t. II. On a construit aussi des appareils donnant la quantité d'eau tombée suivant les divers vents. M. Flaugergues a établi à Toulon un appareil de ce genre, au moyen duquel, à l'aide d'une girouette, la direction de la partie inférieure de l'entonnoir qui reçoit l'eau de pluie, est la même que celle du vent; le réceptacle cylindrique de cet udomètre, divisé en huit compartiments, donne la quantité d'eau correspondante à chaque vent.

On dispose généralement l'udomètre à la surface du sol; à l'Observatoire il y en a deux semblables : l'un placé sur le sol, l'autre sur la terrasse à 27 mètres de hauteur du premier. On ne trouve jamais en moyenne la même quantité d'eau dans les deux appareils; sur la terrasse, la moyenne de vingt-deux années d'observations donne 50 centimètres d'eau, et sur la surface du sol 57 centimètres; dans d'autres pays on a observé des effets analogues. Cette différence de plus de $\frac{1}{10}$ n'est pas encore bien expliquée : tient-elle uniquement à la condensation de la vapeur sur les gouttes de pluie dans le court trajet de 27 mètres, ou bien ne dépend-elle pas aussi d'un effet local, le vent enlevant les gouttes de pluie près de terre, et, par une espèce de remout, les poussant dans le pluvimètre? C'est ce que l'on n'a pas encore décidé.

Une foule de circonstances influent sur la chute de la pluie dans les divers pays : la proximité de la mer, les vents régnants, la latitude, et dans chaque localité les saisons. Afin d'exposer rapidement l'influence de ces diverses causes dans les différents lieux de la terre, nous suivrons les localités depuis l'équateur jusqu'aux latitudes élevées.

Plus un pays est chaud, plus la quantité de vapeur qui s'y accumule est considérable, et plus il doit pleuvoir; cependant, un grand nombre de circonstances locales s'opposent à ce qu'à latitude égale il pleuve également. Mais en dehors de ces causes, toutes choses égales d'ail-

leurs, la quantité de pluie diminue de l'équateur aux pôles. Dans la description que nous allons faire, nous prendrons pour guide l'ouvrage de M. Gasparin, où la question des pluies est traitée avec détail (*Météorologie agricole*, t. II, p. 244 et suivantes).

Sous les tropiques, la pluie tombe avec une régularité beaucoup plus grande que dans les autres pays. Sur mer, partout où l'alizé souffle constamment, il ne pleut pas, mais dans la région des calmes il pleut souvent, et les pluies sont accompagnées de coups de vent. Sur terre, on distingue la saison sèche et la saison humide; ainsi, dans l'Amérique méridionale, pendant l'hiver le ciel est serein, mais au printemps l'air devient humide, le vent moins fréquent, et en mars commencement des orages continuels; dans certains endroits les nuits sont sereines, dans d'autres il pleut davantage la nuit que le jour. L'échauffement du sol et la direction du vent dans cette saison suffisent pour rendre compte de ces pluies qui durent tout l'été.

En Afrique, près de l'équateur, la saison des pluies commence en avril; entre 10° de latitude nord et le tropique, elle dure de juin en octobre. Dans les lieux qui avoisinent l'équateur, le soleil passant deux fois au zénith, il tombe deux fois l'an de grandes quantités d'eau, et il y a pour ainsi dire deux saisons sèches et deux saisons humides. L'eau qui tombe rend l'air tellement humide, que la nuit tout est mouillé. Cette époque est celle des maladies épidémiques fatales aux Européens.

Dans l'Inde, sous les tropiques, l'alternance des pluies est analogue à celle des vents : sur la côte orientale, pendant la mousson S.-O., il ne tombe pas de pluie, et pendant la mousson N.-E. au contraire règne la saison pluvieuse; sur la côte occidentale, c'est l'inverse. Dans l'intérieur du pays les pluies sont rares, et dans les diverses autres localités le climat est sec ou humide, suivant qu'il est plus rapproché de l'une ou de l'autre côte; dans quelques endroits même on a des pluies partielles pendant toute l'année, ou bien deux maxima. On

voit, d'après cela, que les vents chargés d'humidité lors de leur trajet sur la mer, viennent condenser l'eau sur les régions qu'ils traversent ensuite. La quantité d'eau que reçoit le sol en quelques mois est plus forte que celle qui tombe dans nos climats en un an, et on a trouvé que près de la mer cette quantité annuelle pouvait aller à deux ou trois mètres d'eau. Les gouttes de pluie en général sont fort grosses, et tombent à terre avec force.

A mesure que l'on s'éloigne de l'équateur et que l'on avance vers les pôles, on trouve des pluies dont le maximum est en été, mais aussi elles deviennent plus fréquentes dans les autres saisons; car dès que l'on parvient aux points où les vents du sud, provenant des régions chaudes, se mêlent aux masses plus froides, la chute de la pluie doit avoir lieu plus souvent.

En approchant des régions polaires, les vents du nord l'emportent, et l'on se trouve dans une zone à pluies d'hiver. En effet, l'été, les continents ayant une température plus élevée que les mers, les vents du nord arrivent dans des lieux plus chauds et ne déversent pas d'eau; dans l'hiver au contraire, la terre se refroidissant davantage, la vapeur peut être précipitée abondamment à l'état de neige.

On peut consulter la carte hyetographique donnée par M. Berghauss en 1841 dans son Atlas physique, partie météorologique, et l'on verra la position des bandes à pluies d'été et d'hiver dans les différents lieux du globe, les régions où se produisent les tornados, et les pluies des moussons. Cette carte indique aussi quatre régions où il ne pleut jamais, savoir : 1° en Afrique dans le grand désert de Sahara; 2° au nord de l'Inde et de la Chine; 3° quelques points sur les côtes du Pérou et du Chili; 4° quelques points du Mexique. Ces deux dernières régions sont peu étendues.

On remarque, sur le méridien de l'océan Atlantique, comme le fait observer M. de Gasparin : 1° une zone à pluie d'été, depuis l'équateur, jusqu'à la limite où les vents du sud-ouest sont dominants; 2° une zone à pluie

en toute saison; 3° une zone à pluie d'hiver en approchant du cercle polaire.

Dans le continent de l'Europe, en s'avançant de l'équateur vers les pôles, les bandes de pluie éprouvent un changement à cause de la conformation des terres. En effet, on trouve d'abord sous le méridien de l'Europe centrale des pluies d'été équatoriales, puis un espace sans pluies dont nous venons de parler. Ensuite les vents du nord qui règnent au nord de cet espace, étant très-échauffés pendant l'été, ne donnent pas lieu à une condensation de vapeur; les vents du sud n'arrivant pas non plus dans cette saison au point de saturation, ce n'est que l'hiver, lorsque les vents du nord sont fréquents et se mêlent aux vents du sud, que les pluies sont à leur maximum. On trouve donc après la zone sans pluie, une zone à pluies d'hiver, puis une zone à pluie en toute saison, mais principalement l'été, et enfin une zone polaire à pluies d'hiver.

Tels sont les effets généraux de la distribution géographique des pluies; mais les circonstances particulières vont apparaître dans les exemples que nous allons citer.

Le tableau de la page suivante indique, d'après M. de Gasparin, la quantité moyenne annuelle de pluie dans différentes localités, suivant les latitudes. On voit que la quantité de pluie diminue en moyenne à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur; mais les anomalies que présente la sécheresse de Seringapatnam, les pluies de l'Angleterre plus fortes que celles de France, et l'anomalie de Bergen en Scandinavie, montrent l'influence de causes locales autres que la latitude. Les causes prédominantes sont, sans aucun doute, la position des localités dans une enceinte fermée du côté opposé aux vents humides, et le trajet des vents humides sur un pays élevé et froid. En effet si l'on forme le tableau des localités où les pluies annuelles donnent plus de 1 mètre d'eau, on trouve qu'à Chambéry, situé entre la direction du vent S.-O. et le mont Blanc, la quantité de pluie est 1^{m}, 653; à Bergen,

DIFFÉRENTS LIEUX DE LA TERRE.						CÔTES DE L'ANCIEN CONTINENT.		
LOCALITÉS.	LATITUDE.	QUANTITÉ de pluie.	LOCALITÉS.	LATITUDE.	QUANTITÉ de pluie.	LOCALITÉS.	LATITUDE.	QUANTITÉ de pluie.
		mm			mm			
Christianborg (Guinée)..	5° 5'	549,0	Charlestown..........	32°46'	1210,9	Christianborg...	5° 5'	549,0
Kandy..............	7 35	1864,9	Tunis...............	36 47	1292,0	Sierra-Leone....	8 29	2191,0
Sierra-Leone.........	8 29	2191,0	Marietta (Ohio)........	39 0	1082,3	Funchal (Madère).	32 37	757,0
Grenade (île de)......	12 2	2844,9	New-Bedford (Ét.-Unis).	41 38	1257,8	Lisbonne......	38 42	608,1
Seringapatnam........	12 25	601,6	Italie au S. de l'Apennin.	37° à 43°	930,0	Bordeaux.......	44 50	650,0
Tivoli (Saint-Domingue).	18 35	2733,8	Vallée du Rhône......	43 à 47	781,0	La Rochelle....	46 9	652,2
Bombay.............	18 56	2350,0	Italie au N. de l'Apennin.	45 à 47	1336,9	Nantes........	47 13	1292,0
Sahara et Égypte......	20 0	"	France septentrionale..	43 à 47	656,8	Middelbourg....	51 29	655,5
Macao..............	22 1	1746,9	Allemagne..........	45 à 54	678,0	Breda.........	51 35	646,6
Calcutta............	22 33	1928,6	Angleterre..........	50 à 56	784,0	Rotterdam.....	51 55	573,5
Rio-Janeiro..........	22 54	1505,0	Scandinavie.........	55 à 62	478,0	Zwambourg.....	52 29	660,6
La Havane..........	23 9	2320,7	Bergen.............	60°24'	2250,4	Hambourg......	50 0	597,0
Nouvelle-Orléans......	29 57	1270,0	Russie..............	50° à 60°	403,9	Copenhague....	55 0	468,4
Madère.............	32 27	757,0	....	......	....	Bergue........	60 24	2250,4

situé dans la même position par rapport aux Alpes scandinaviennes, 2^m,250 ; à Tolmerro, dans l'entonnoir que forme la terre ferme de Venise, 2^m,422 (c'est une des localités où il pleut le plus en Europe). On voit donc que les nuages arrêtés par des chaînes de montagnes se déchargent de leur eau avant de surmonter cet obstacle, en outre, si les masses gazeuses traversent une grande étendue de pays, elles perdent leur humidité, et parviennent plus sèches dans les localités où elles arrivent postérieurement. Nous renvoyons pour de plus amples détails à l'ouvrage déjà cité de M. de Gasparin. Nous nous bornerons à rapporter les nombres suivants, qui indiquent la quantité de pluie tombée en Europe dans les diverses saisons.

PAYS.	QUANTITÉ MOYENNE DE PLUIE.				
	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.	ANNÉE ENT^{re}.
	mm	mm	mm	mm	mm
Angleterre, à l'ouest.. ...	239,6	171,0	221,6	283,3	915,5
Côtes O. de l'Europe.. ...	185,7	140,9	170,2	246,5	743,3
Angleterre, à l'est.......	166,5	145,0	171,1	204,1	686,7
France méridionale, Italie au S. des Apennins.	195,2	194,2	133,2	291,7	804,3
Italie, au N. des Apennins.	139,2	253,1	275,6	353,8	1021,7
France septentrionale et Allemagne............	126,5	148,0	229,7	174,2	678,4
Scandinavie............	81,4	76,1	170,7	148,4	476,6
Russie................	40,3	59,9	166,7	97,2	364,1

« On remarque, dit M. de Gasparin, la prédominance « des pluies d'automne sur les pluies d'été, dans toutes « les régions situées sur les bords de la Méditerra- « née et à l'ouest du continent, jusqu'à la hauteur

« de l'Angleterre; au nord et à l'ouest de cette bande, « le maximum des pluies tombe en été. Ainsi dans la « bande des pays à pluies d'automne se trouvent l'An- « gleterre entière, les côtes de l'ouest du continent « jusqu'en Normandie, la France méridionale, l'Italie, « la Grèce, l'Asie-Mineure, la Syrie, l'Égypte, la Bar- « barie, Madère; la bande à pluies d'été comprend la « France septentrionale, l'Allemagne, les côtes de « l'Océan à partir de la hauteur de l'Angleterre, l'in- « terposition de cette île entre la direction des vents « pluvieux et les Pays-Bas, les transformant en pays « continentaux; en un mot, tout ce qui se trouve au « nord du plateau central de l'Europe, prolongé des « Alpes vers les monts Carpathes, laissant au midi la « vallée du Danube, au-dessous de Vienne. »

La petite quantité d'eau ou de neige qui tombe en Russie est due à l'épuisement des vapeurs dans les pays intermédiaires.

Quant aux jours de pluie, qu'il est important de connaître pour la climatologie, on peut consulter les nombreux tableaux donnés par M. de Gasparin; on voit alors qu'en moyenne ces jours de pluie vont en augmentant en s'approchant de l'équateur; ils ne sont pas toujours dans le même rapport que la quantité de pluie tombée, puisque dans des localités, les averses par leur abondance peuvent compenser leur nombre. Nous indiquerons d'après le même auteur le nombre de jours de pluie en Europe, suivant les diverses saisons.

PAYS.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.	ANNÉE ENTIÈRE
Angleterre, à l'ouest.....	43,1	37,6	33,9	44,9	159,5
Angleterre, à l'est......	40,0	39,5	34,4	38,8	152,7
Côtes de l'ouest........	34,4	34,4	32,9	38,0	139,7
France méridionale, Italie du sud..............	25,4	25,2	15,2	25,4	91,2
Italie, au N. des Apennins.	25,4	27,1	25,1	26,6	104,2
France septentrionale et Allemagne...........	36,1	37,0	36,8	35,0	144,9
Scandinavie...........	35,2	30,3	32,6	35,1	133,2
Russie................	23,1	23,4	27,9	26,5	100,9

« A la vue de ce tableau, dit M. de Gasparin, qui « ne croirait qu'il dessine la véritable distribution des « cultures en Europe?..... La quatrième région ne « serait-elle pas le pays par excellence des froments? « et c'est dans cette région que se trouvent les anciens « greniers de l'Europe, la Sicile, l'Égypte, la Barbarie.... »

Il résulte des détails dans lesquels nous sommes entrés, que le vent doit avoir une influence prédominante sur la pluie, suivant les points d'où il souffle et les localités qu'il a traversées avant d'arriver au lieu de l'observation. Si les vents traversent de vastes étendues de mer, ils peuvent se saturer de vapeur et sont humides; tels sont les vents S.-O. sur les côtes occidentales de l'Europe. Si les vents traversent de grandes régions continentales, alors ils sont secs; tels sont les vents S.-O. en Égypte et en Arabie, qui sont chauds et secs. Pour que ces vents deviennent vents de pluie, il est nécessaire qu'ils soient refroidis, afin que la vapeur se précipite; s'il sont humides, leur arrivée dans un pays froid condense la vapeur; s'ils sont secs, ils peuvent, en refroidissant une masse gazeuse humide et chaude, déverser de l'eau. Ainsi

à Paris le vent S.-O. est pluvieux, puisqu'il se trouve dans le premier cas; en Provence le vent N. amène de la pluie, car il est plus froid et rencontre les masses d'air chaudes et humides du sud.

Sans entrer dans de plus grands détails, nous nous contenterons d'extraire du tableau donné par M. de Gasparin, les probabilités de la pluie par divers vents dans quelques localités.

LOCALITÉS.	N.	N.-E.	E.	S.-E.	S.	S.-O.	O.	N.-O.
Paris.........	0,13	0,09	0,11	0,29	0,39	0,85	0,54	0,38
Berlin.........	0,48	0,31	0,30	0,26	0,33	0,51	0,57	0,58
Pétersbourg....	1,00	0,46	0,82	0,71	0,84	1,00	0,45	0,79

Ces nombres indiquent qu'à Paris, par exemple, lorsque le vent souffle du S.-O., il y a 85 à parier sur 100 qu'il pleuvra; tandis que, lorsque le vent souffle du N.-E., la probabilité de pluie n'est que de 9 sur 100. Il y a donc $\frac{85}{9}$ fois plus de chance de pluie par le vent du S.-O. que par le vent du N.-O.

La quantité totale d'eau qui peut tomber à l'état de pluie, en une seule averse, est très-variable; sous les tropiques, où il pleut moins longtemps que dans nos climats, les averses sont plus abondantes. Si l'on réunit quelques-uns des résultats les plus remarquables obtenus jusqu'à ce jour, on trouve :

En 1819, à Bombay, il est tombé, en un jour.................... 162mm,4 d'eau.

A Cayenne, d'après une observation de M. Roussin, il est tombé en

dix heures. . . . . 277^{mm},8 d'eau.

Dans les latitudes plus élevées, les pluies sont moins fortes; cependant on a cité les exemples suivants :

Les inondations de l'Ardèche en 1827 furent causées par des pluies qui donnèrent, à Joyeuse, les 8 et 9 octobre, en 24 heures. 791^{mm},7

On a trouvé à Gènes, en 1 jour (25 oct. 1822). 812^{mm},1

A Genève, en 3 heures. . . . . 160^{mm}

A Bruxelles, en 3 heures (4 juin 1839). . . . . . 112^{mm},8

Cuiseaux est une petite ville dans le bassin de la Saône où il pleut plus que dans tout autre point de la vallée. Après les inondations de 1841, on a observé en 68 heures c'est-à-dire en moins de 3 jours. . . 270^{mm}, tandis que près de Lyon, il n'est tombé que. . 150^{mm}.

Ces exemples sont exceptionnels, car en moyenne, les jours de pluie, dans quelques localités désignées plus haut il tombe :

A Gènes. . . . . 10^{mm},2

A Joyeuse. . . . . 12 ,6

A Paris, le nombre des jours de pluie étant 147, comme il tombe par an 570^{mm} d'eau, en un jour de pluie, il tombe en moyenne. . . . . 4^{mm}.

Nous ne devons pas terminer ce qui concerne la pluie, sans faire mention de ces gouttes d'eau qui tombent sans qu'il y ait apparence de nuage au-dessus de l'observateur. Le serein, comme on l'a déjà vu, est un exemple de petites gouttes d'eau provenant de la condensation immédiate des vapeurs d'une région peu élevée; mais ici il est question de grosses gouttes qui mouillent le sol, même en plein midi, tandis que le ciel reste bleu. M. de Humboldt cite plusieurs exemples de ces pluies, et, d'après M. Kaemtz, le phénomène se reproduirait en moyenne deux fois par an. On a émis l'opinion qu'il pouvait bien se faire que les gouttes eussent été d'abord de petites parcelles de glace dans les régions supérieures de l'atmosphère, et qu'ensuite elles fussent devenues de grosses gouttes fondues par agglomération.

De la neige et du grésil.— Lorsque la température

de l'air est voisine de zéro, ou plus basse, ou plus haute, il tombe de la neige au lieu de pluie; plus la température de l'atmosphère est basse, moins la quantité de neige qui tombe est considérable, car la quantité de vapeur aqueuse contenue dans un volume donné d'air est d'autant plus faible que l'air est plus froid.

La neige affecte un très-grand nombre de formes; il est probable que les variétés observées s'élèvent à plusieurs centaines. Scoresby, dans ses voyages aux régions polaires, a décrit les différentes formes de neige qu'il a observées; il les rapporte à cinq types principaux que voici :

1° Lamelles minces.

2° Noyau sphérique ou plan, hérissé d'aiguilles ramifiées.

3° Aiguilles fines ou prismes à six pans.

4° Pyramides à six faces (observées une seule fois seulement).

5° Aiguilles terminées à une de leurs extrémités ou à toutes les deux par une petite lamelle.

Mais en général les formes prédominantes sont des prismes droits à six pans, dont les modifications peuvent donner lieu à des lamelles minces ou longues.

La chute de la neige ne se montrant que dans les régions où la température arrive près de zéro, sous l'équateur il ne neige que sur les montagnes.

D'après les observations faites en Europe, M. de Gasparin a conclu que l'on pouvait diviser ce continent en trois régions : la première comprenant le Midi, où la neige fond en tombant; la seconde, une contrée intermédiaire où la durée de la neige est plus longue : la France septentrionale et la Belgique sont dans cette section; enfin la troisième qui conserve la neige tout l'hiver : cette partie comprend tous les pays au nord et à l'est, depuis la Franconie et le revers oriental de la Forêt-Noire, jusque dans les plaines de la Hongrie.

On peut voir dans l'ouvrage de M. de Gasparin, tome II, page 302, un tableau renfermant le nombre

de jours de neige, suivant les divers mois, dans différents lieux du globe.

Le grésil, comme la neige, est également de l'eau congelée; il est composé de petites aiguilles de glace pressées et même enveloppées quelquefois d'une couche de glace transparente. On ne connaît pas les causes de sa formation; c'est un état, pour ainsi dire, intermédiaire entre la neige et la grêle, et les observateurs prétendent que les nuages qui lui donnent naissance sont fortement électrisés.

On observe quelquefois dans l'air un grand nombre de particules brillantes qui ne sont autres que des flocons de neige réfléchissant les rayons solaires. Ces petits cristaux de glace se forment probablement par la condensation immédiate des vapeurs dans une atmosphère ayant une température au-dessous de zéro.

Dans les localités où la neige séjourne, comme sur les montagnes et dans le Nord, on trouve que la neige est quelquefois pénétrée de matière colorante rouge, laquelle lui a fait donner le nom de neige rouge. Les granules qui composent cette matière sont des végétaux d'une structure excessivement simple; il paraîtrait même que ces végétaux peuvent verdir et colorer la neige en vert.

§ IV. — *De la pression atmosphérique pendant la pluie et les tempêtes.*

Baromètre pendant la pluie. — Tous les observateurs qui suivent les variations barométriques ont remarqué que le baromètre reste habituellement assez bas à l'approche de la pluie, et se maintient au contraire élevé lorsque le temps est beau; cette coïncidence provient uniquement de la position de nos contrées et de la direction des vents qui amènent la pluie. On doit se souvenir que la colonne barométrique ne mesurant que le poids de la colonne atmosphérique située au-dessus de l'observateur, change avec les différents vents, et se tient en général plus bas dans les lieux où la température s'élève: c'est-à-dire que les vents chauds abaissent le baromètre

et que les vents froids l'élèvent ; il résulte de là que les vents sud-ouest, qui, dans nos contrées, amènent le plus souvent la pluie, étant les plus chauds, le baromètre doit se tenir bas lorsque les vents soufflent dans cette direction. Ce fait général souffre beaucoup d'exceptions, et il est nécessaire, pour bien faire comprendre le phénomène, d'entrer dans quelques détails à cet égard.

D'après la théorie des vapeurs, l'eau se vaporisant dans l'air comme dans le vide, mais seulement avec plus de lenteur, il en résulte que si une masse d'air est en contact avec de l'eau à une certaine température, l'air se sature de vapeur et augmente de poids; alors, suivant ce principe, une masse d'air, un vent, parcourant une surface d'eau capable de donner des vapeurs, acquiert un poids plus considérable. La température étant de 15°, par exemple, chaque mètre cube d'air pèsera $12^{gr},5$ de plus que s'il était sec, et son poids, au lieu d'être 1300^{gr}, sera $1312^{gr},5$; l'augmentation est de 1 centième. Si l'on suppose d'après cela qu'une masse d'air de 1000^{m} de hauteur soit saturée de vapeur à 15°, la quantité d'eau qu'elle renferme ferait équilibre à une hauteur barométrique mercurielle de 10^{mm}; en admettant que cette masse passe de 15° à 10°, alors il se condensera un poids de vapeur équivalent à 3^{mm} de mercure. Des différences plus considérables peuvent amener des résultats plus marqués.

Un vent agit donc sur le baromètre par sa température et par son humidité; la première influence tendant à abaisser la colonne mercurielle, la deuxième à l'élever. Dans nos climats, ce serait la première cause qui l'emporterait, dans d'autres on pourrait observer des effets contraires; ainsi, d'après M. Kaemtz, Flinders a vu que sur les côtes de la Nouvelle-Hollande les vents de terre, secs et chauds, font baisser le baromètre; à l'embouchure de la Plata, les vents de mer E. tiennent le baromètre plus haut que les vents O. qui soufflent de la terre.

Lorsque, dans un lieu quelconque, la pluie vient à tomber, comme le poids de l'eau entrait dans la valeur du

poids de l'atmosphère au-dessus du baromètre, toutes choses égales d'ailleurs après la chute de la pluie, le baromètre devrait se tenir plus bas; mais quelquefois on observe un effet inverse. Il faut tenir compte dans ce cas de la direction du vent et des causes même qui lui ont donné naissance.

Quand la pluie tombe d'une manière continue, l'état du baromètre dépend de la direction du vent et de la condensation des vapeurs qui diminue le poids de l'atmosphère; mais si la pluie provient d'une averse courte et isolée ou d'un orage, c'est-à-dire du passage d'un ou de plusieurs nuages au-dessus de l'observateur, alors le poids de cette masse nuageuse étant supporté par l'atmosphère, il en résulte une espèce de vague qui passe sur le baromètre, et l'on peut observer une ascension de la colonne mercurielle pendant la pluie, cessant quelque temps après.

En général, par les temps de pluie, le baromètre se tient au-dessous de la moyenne correspondante au vent régnant seul; d'après cela, le baromètre ne peut servir comme pronostic de pluie qu'en indiquant la direction du vent régnant; le baromètre baisse, non pas parce qu'il doit pleuvoir, mais bien parce que la diminution de pression est occasionnée par un vent amenant de la pluie : la pluie n'est pas une cause, mais un effet. Il serait donc plus juste de mettre sur les baromètres que l'on trouve dans tous les appartements, au lieu des mots beau-temps, pluie ou vent, etc., les noms des vents N.-E., S.-O., etc. (voyez p. 338), qui correspondent en moyenne à ces hauteurs barométriques. (La dénomination de pluie correspond habituellement à 4 ou 5^{mm} au-dessous de la moyenne annuelle barométrique du lieu.)

M. Dove, d'après une théorie dont nous avons parlé page 344, a expliqué les vents variables de nos contrées par la rencontre simultanée des vents S.-O. et N.-E. (pl. II, fig. 5), et il a déduit d'un grand nombre d'observations, que, dans notre hémisphère, le vent passe le plus souvent de l'E. à l'O. par le sud, et dans

l'hémisphère austral, de l'E. à l'O. par le nord. Il a conclu de ces combats des deux vents, l'un chaud et humide dans nos contrées, le S.-O., l'autre sec et froid, le N.-E., qu'à l'O., un vent froid succède à un vent chaud, et qu'à l'E., c'est l'inverse, un vent chaud succède à un vent froid. Il a cherché les pressions pendant la pluie sous les différents vents, et a été conduit à cette conséquence, que, pendant la pluie, le baromètre baisse avec le vent d'est et monte avec le vent d'ouest.

Nous ne rapporterons pas une foule de déductions que l'on a tirées des observations barométriques faites par différents vents et par la pluie, car il est impossible de formuler des lois générales à cet égard, les causes qui concourent à ces effets étant très-complexes.

Toutes les fois que dans une partie de l'atmosphère l'équilibre de la masse gazeuse est rompu, aussitôt un mouvement se communique de proche en proche, et se transmet, comme une immense vague, en donnant naissance à des vents plus ou moins violents. L'échauffement diurne et une foule de causes que l'on n'a pu apprécier, donnent lieu à des mouvements réguliers de la colonne barométrique; mais si accidentellement, en un point de la terre, la température s'élève beaucoup, l'équilibre est détruit, et son rétablissement occasionne des déplacements d'air, des agitations de l'atmosphère capables de produire des effets désastreux; il se produit alors des tempêtes. En général, dans ces grands déplacements d'air, la colonne barométrique oscille sans cesse irrégulièrement et à de courts intervalles. Ainsi, des oscillations fréquentes ou un grand changement dans la hauteur de la colonne barométrique indiquent de grandes perturbations atmosphériques; on peut donc prévoir par là un ouragan ou des coups de vent dans le lieu où se trouve l'observateur ou dans des lieux voisins. Les navigateurs, qui ont un grand intérêt à connaître les signes précurseurs des tempêtes, consultent toujours le baromètre, et Scoresby assure avoir pu prévoir, d'après ses observations, 17 tempêtes sur 18.

CHAPITRE V.

OPTIQUE MÉTÉOROLOGIQUE.

L'atmosphère qui enveloppe la terre et la sépare des espaces planétaires n'a pas une transparence parfaite ; interposée entre les astres lumineux et un observateur, elle forme comme un voile qui réfléchit en tout sens la lumière, et donne lieu à un grand nombre de phénomènes optiques remarquables. La teinte bleue du ciel provient en effet de la réflexion des rayons lumineux sur les particules d'air ; car, à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère et que la quantité d'air située au-dessus de l'observateur diminue, le ciel se fonce de plus en plus. Cette couleur bleue est du reste modifiée par la présence des vapeurs, des nuages, et des corps étrangers qui sont en suspension dans l'air. C'est encore par suite de la diffusion de la lumière sur les molécules atmosphériques que les diverses régions du globe ne sont pas plongées tout à coup dans les ténèbres, lorsque le soleil quitte l'horizon ; de sorte que l'air qui s'oppose à ce que la terre, après le coucher du soleil, soit exposée à un refroidissement considérable pendant la nuit, en réfléchissant les rayons lumineux dans tous les sens, rend visibles les objets qui ne sont pas éclairés directement par cet astre. Nous allons successivement passer en revue les différents météores lumineux que l'on observe dans l'atmosphère (1).

(1) L'air interposé entre les astres et nous produit une foule de phénomènes lumineux dont nous allons essayer d'indiquer la cause. Indépendamment de ces effets, il est une illusion d'optique dont nous devons dire quelques mots, parce que tout le monde est à même de l'observer fréquemment et de la vérifier : Lorsque

SECTION Ire.

COULEUR DE L'AIR; TRANSPARENCE DE L'ATMOSPHÈRE; COULEUR DES ASTRES.

§ I. — *Couleur de l'air.*

Les rayons lumineux sont réfléchis dans tous les sens par les particules d'air atmosphérique. Si tous les rayons colorés qui composent la lumière solaire se réfléchissaient de la même manière et avec la même énergie, l'atmosphère nous paraîtrait blanche; mais s'il n'en est pas ainsi, la teinte doit paraître de la couleur des rayons qui sont réfléchis avec plus de force. Le bleu de l'atmosphère tient donc à ce que les rayons bleus sont réfléchis en plus grande abondance que les autres rayons du spectre solaire; le bleu est donc la couleur par réflexion des particules d'air.

---

le soleil et la lune sont à leur lever ou à leur coucher, c'est-à-dire lorsqu'ils se trouvent près de l'horizon, ils paraissent avoir une dimension beaucoup plus grande que lorsqu'ils sont au zénith; il est aisé de se convaincre qu'il n'en est réellement pas ainsi, puisque, à travers un tube de carton ou un verre noirci, cette illusion disparaît. Cette illusion doit être attribuée à la même cause qui nous fait paraître le ciel comme une voûte surbaissée: en effet, nous apercevons vers l'horizon une succession de corps dont nous jugeons facilement la distance relative, et dont nous sommes habitués à comparer les grandeurs et les positions; nous pensons alors que l'atmosphère doit s'étendre bien au-delà de ces corps, et que les astres sont situés beaucoup plus loin, tandis que vers le zénith rien ne se trouve disposé pour nous permettre de comparer la position et la distance des objets. Il résulte de là que les distances dans le sens vertical sont beaucoup plus mal appréciées que dans le sens horizontal, et que nous pouvons quelquefois nous tromper beaucoup dans nos évaluations. Comme nous croyons les objets et les astres plus éloignés dans le sens horizontal que dans le sens vertical, quoique nous les voyions toujours réellement sous le même angle visuel, il en résulte qu'ils nous paraissent plus grands dans le premier cas que dans le second; c'est une question de jugement et non d'évaluation angulaire, car, vers l'horizon, le diamètre vertical est plutôt diminué par l'effet de la réfraction qu'au zénith.

Lorsqu'un corps réfléchit de préférence certains rayons de lumière blanche, c'est qu'il transmet ou absorbe les rayons complémentaires; ainsi les particules d'air qui reçoivent un faisceau de lumière blanche réfléchissent une partie de ce faisceau, mais principalement les rayons bleus, et transmettent ou éteignent les autres. L'optique des gaz n'est pas encore assez avancée pour que l'on puisse connaître avec certitude toutes les circonstances d'absorption et de transmission des rayons à travers l'air; mais d'après toute probabilité, en suivant la marche d'un faisceau de rayons solaires qui traverse une masse d'air, ce faisceau doit perdre des rayons bleus par la diffusion sur les particules d'air, et devrait devenir jaunâtre s'il traversait une couche atmosphérique suffisamment épaisse. D'après cela, l'air, de même que l'eau, comme nous l'avons vu en parlant de la couleur de la mer, doit être classé parmi les substances qui sont d'une couleur différente par réflexion et par transmission.

On pourrait citer les observations suivantes à l'appui de cette manière de voir. En général, même par un temps serein, à mesure que le soleil s'approche de l'horizon, sa teinte tourne au jaune; en outre, l'épaisseur gazeuse que la lumière traverse étant alors beaucoup plus considérable que dans la direction du zénith (environ douze fois et demie), l'action absorbante de l'air se fait sentir avec plus d'intensité, et les yeux d'un observateur peuvent regarder cet astre près de l'horizon, alors qu'ils ne pouvaient supporter sa lumière près du zénith. L'analyse du spectre solaire conduit au même résultat; si l'on suit la constitution de cette image réfractée à mesure que la hauteur angulaire du soleil change, on voit la partie violette s'effacer peu à peu, et à la fin l'image se compose seulement du rouge, de l'orangé, du jaune, du vert et d'un peu de bleu. La présence des raies noires du spectre, qui sont beaucoup plus nombreuses dans la partie la plus réfrangible, montre également que les rayons bleus et violets sont les éléments

les plus absorbables lors du passage de la lumière à travers l'atmosphère.

Il faut observer toutefois que les propriétés optiques de la vapeur d'eau donnent plus d'intensité à ces phénomènes, si elles n'en sont pas en grande partie la cause. Les teintes jaunâtres que prennent le soleil et la lune à travers certains nuages ont cette origine, et la couleur rouge foncé du soleil couchant provient de ce que la lumière de cet astre n'arrive vers nous qu'à travers une couche épaisse atmosphérique chargée de vapeur; c'est ce motif qui a fait considérer la teinte rouge de l'horizon au soleil couchant comme pronostic d'humidité. On voit par là qu'il est impossible, dans l'absorption de la lumière, de distinguer ce qui est relatif à la vapeur et ce qui se rapporte à l'air sec et pur, attendu que l'atmosphère est toujours chargée d'humidité.

L'atmosphère agit donc par diffusion en nous envoyant dans toutes les directions de préférence des rayons bleus, et par transparence en nous transmettant principalement la partie la moins réfrangible du spectre; d'après cela, la teinte bleue de l'air doit se mélanger aux teintes des objets éloignés. On peut se demander alors pourquoi certains objets blancs, vus à quelque distance à la surface de la terre, ne changent pas de couleur, et ne donnent lieu qu'à un affaiblissement d'intensité lumineuse; cela devrait avoir lieu d'autant mieux qu'en supposant l'air à la pression de 76 centimètres, une colonne gazeuse horizontale d'une épaisseur de 7951 mètres, ou à peu près deux lieues, ferait équilibre à la même pression que celle de la colonne d'air située au-dessus de la tête de l'observateur; ainsi un objet situé à 10 lieues envoie des rayons qui traversent une couche cinq fois plus épaisse que celle qui est au-dessus de nous au zénith. La réponse est facile : Un objet A (pl. I, fig. 9), supposé blanc, n'est rendu visible à un observateur placé en O à la surface de la terre MN, que par suite de la réflexion irrégulière des rayons envoyés par le soleil et par le reste de l'atmosphère; de

sorte que O reçoit les rayons diffusés par A, qui arrivent dans la direction AO. Or, ces rayons doivent perdre une partie de leurs éléments bleus, par suite des réflexions sur les particules atmosphériques situées entre A et O; mais comme toutes ces particules reçoivent aussi de la lumière, étant éclairées de même que A, il en résulte que l'observateur O reçoit en même temps que l'image jaunâtre A, la sensation bleuâtre produite par l'épaisseur atmosphérique AO, et l'objet reste blanc. C'est ainsi que des montagnes éloignées couvertes de neige sont vues blanches.

Lorsque les objets sont colorés, les effets sont différents: s'ils sont rouges ou jaunes, n'ayant pas de rayons bleus, ils ne perdent pas d'éléments dans leur trajet et on doit les voir un peu verdir, par suite de la teinte bleue des particules d'air situées entre ces deux positions. Si A était complétement noir ou n'envoyait pas de lumière, alors on le verrait bleu, parce que les rayons réfléchis irrégulièrement par les particules d'air situées entre A et O arriveraient seuls à l'œil; les montagnes très-foncées doivent donc tourner au bleuâtre quand on les voit fort loin. Ainsi, dans tous les cas, la teinte de l'air se reflète sur les objets éloignés; il est facile de prévoir ces diverses apparences, d'après les principes de l'optique.

La couleur bleue de l'atmosphère n'est pas aussi foncée vers l'horizon qu'au zénith, puisque dans les couches inférieures il existe beaucoup plus de vapeur, de vésicules de brouillards, qui donnent une teinte blanche à l'azur du ciel. On a imaginé plusieurs procédés pour évaluer l'intensité du bleu atmosphérique, et on a construit à cet effet différents *cyanomètres*. Celui de Saussure se compose d'une série de 53 rectangles de papier bleu, auxquels on compare la couleur du ciel; les extrêmes sont deux rectangles, l'un bleu de cobalt très-foncé, l'autre blanc; il y a donc 51 nuances intermédiaires. Pour obtenir ces nuances, on prend un grand nombre de bandes de papier coloré et on les compare l'une à l'autre. On part de ce

principe, que deux nuances très-voisines se confondent lorsqu'elles sont éloignées convenablement de l'observateur. Alors on se place à une distance telle, qu'un cercle noir de 4 millimètres de diamètre, peint sur un fond blanc, disparaisse en s'en éloignant graduellement; cet effet est dû à l'irradiation, en vertu de laquelle l'image du fond blanc sur la rétine empiète sur l'image du cercle noir, et à une certaine distance, dépendant du diamètre de cette image, elle n'est plus visible. Cette distance obtenue, on prend deux des nuances de bleu, et on répète la même observation en s'en éloignant et examinant si la différence des teintes disparaît à la même distance que le cercle noir, plus près ou plus loin; on les rejette toujours dans ces deux derniers cas, et on ne les prend que lorsque cette différence ne disparaît qu'à la même distance. Dans ces circonstances, de Saussure a pu trouver 51 nuances intermédiaires entre le bleu de cobalt très-foncé et le blanc qu'il a représenté par zéro; en comparant alors la teinte du ciel à celle des rectangles de papier bleu, on voit à quelle nuance on s'arrête, et le numéro du rectangle indique l'intensité du bleu atmosphérique.

On a construit aussi des échelles de couleurs analogues, mais qui sont formées d'un moins grand nombre de teintes.

D'autres principes physiques peuvent être invoqués dans la construction des cyanomètres. M. Arago et M. Biot (*Annales de physique*, t. IV, p. 91) ont proposé des appareils avec lesquels on peut comparer les teintes bleues du ciel avec l'une de celles que l'on obtient à l'aide du passage de la lumière polarisée à travers des lames cristallisées.

Du reste, il faut remarquer que ces divers procédés sont d'une application délicate et ne peuvent donner que des approximations, vu qu'ils exigent que le ciel soit toujours du même bleu, ce qui n'a pas lieu; il existe souvent des teintes grises et jaunes dans l'atmosphère qui ne peuvent être comparées à aucune des teintes bleues

des cyanomètres. Si l'on ajoute à cette difficulté les effets de contraste et les incertitudes qui proviennent en général de la comparaison des couleurs, d'où il résulte que deux observateurs placés dans les mêmes circonstances ne jugent pas les teintes de la même manière, on conçoit que ces déterminations, comme beaucoup d'autres qui sont du ressort de la photométrie, n'aient pas été d'une grande utilité et n'aient conduit jusqu'à présent à aucun résultat satisfaisant. Nous nous bornerons donc aux observations suivantes : la couleur du ciel devient plus foncée depuis le matin jusqu'au milieu du jour, puis ensuite elle redevient plus claire vers le soir; les sphérules de vapeur ou de neige jetant une teinte de blanc dans la couleur du ciel, la voûte céleste est plus bleue au zénith que vers l'horizon, plus foncée dans l'intérieur des continents qu'en pleine mer, et vers l'équateur que dans les hautes latitudes.

Avec le cyanomètre de Saussure, le bleu du ciel à Paris peut être évalué en moyenne à 16°, et à 23° sous les tropiques; au sommet du mont Blanc, de Saussure a vu le cyanomètre marquer 39°, et M. de Humboldt a jugé que le bleu était représenté par 41 au sommet du pic de Ténériffe; sur les Andes, à 6000 mètres, l'instrument a donné 46. Ces nombres, d'après ce que nous avons dit plus haut, ne sont que des approximations capables de nous donner une idée de la teinte du ciel.

§ II. — *Transparence de l'air. — Couleur des astres.*

L'air atmosphérique, comme tous les corps transparents, absorbe une portion des rayons lumineux qu'il reçoit. Cette absorption, abstraction faite de la réfrangibilité des rayons solaires, étant du même ordre que celle qui a lieu à l'égard des rayons calorifiques, nous rappellerons qu'on a trouvé, à l'aide des actinomètres, qu'un faisceau de rayons calorifiques pénétrant l'atmosphère, et dont l'intensité serait égale à 1, quand le soleil est au zénith, n'aurait plus à la surface de la

terre qu'une valeur comprise entre 0,79 et 0,73, suivant la transparence de l'air. Bouguer a trouvé, pour les rayons lumineux (Laplace, *Exposition du système du monde*), le nombre 0,81, en supposant l'air très-serein et les couches également denses; on peut en effet supposer que l'absorption, toutes choses égales d'ailleurs, ne dépend que de la quantité des particules matérielles placées sur la route des rayons lumineux. Les vapeurs répandues dans l'air influent beaucoup sur sa transparence et réduisent ce nombre; mais, en moyenne, par un temps serein et lorsque le soleil est au zénith, on peut donc admettre approximativement qu'un rayon lumineux direct a perdu le $\frac{1}{5}$ de sa valeur lorsqu'il parvient à nous.

Quand les rayons traversent une couche d'air plus considérable, alors l'extinction augmente. Si le soleil étant au zénith en S (planche I, fig. 10) donne un rayon SA, qui n'a que les $\frac{4}{5}$ de sa valeur primitive, alors, en supposant l'astre à l'horizon en S″, il est facile de voir que AB=AZ (12,7), en admettant que AZ = 1 et OA le rayon de la terre = 80; AZ étant l'épaisseur de l'atmosphère, la valeur de l'intensité lumineuse du rayon AS″ arrivé en A, si l'on suppose la même extinction et la même transparence de l'atmosphère, sera $\left(\frac{4}{5}\right)^{12,7}$ = 0,058, ou à peu près 5 ou 6 centièmes de sa valeur primitive. Ce calcul n'est qu'approximatif, bien entendu. Ainsi, sans autre cause que la présence de l'air, et en admettant pour un instant que l'absorption s'exerce de la même manière sur tous les rayons lumineux, le soleil à l'horizon a une intensité lumineuse assez faible qui permet de le regarder à l'œil nu, tandis que son éclat au zénith est trop grand pour que la vue puisse le supporter.

La transparence de l'atmosphère changeant continuellement par suite de la présence des vapeurs, de Saussure a essayé de la mesurer à l'aide de son *diaphanomètre*. Cet appareil est fondé sur le même principe que son cyanomètre; il se compose de deux cartons

blancs, sur lesquels il a tracé des cercles noirs, l'un de 5 centimètres de diamètre, l'autre douze fois plus grand ou de 60 centimètres. Si l'air était doué d'une transparence parfaite et que l'on s'éloignât successivement des deux cartons jusqu'à ce que l'on cessât d'apercevoir les cercles, les distances devraient être entre elles comme 1 : 12, puisqu'à une distance douze fois plus grande, le diamètre angulaire du grand cercle devient égal à celui du petit; comme on ne trouve jamais ce rapport, mais, par exemple, 1 : 11,4, la différence entre les derniers termes de ces rapports indique l'absorption de l'air. Ce procédé n'est pas susceptible d'exactitude, et les objections qui se rapportent aux cyanomètres s'appliquent aussi aux diaphanomètres. On a proposé d'autres appareils, mais jusqu'ici, à notre connaissance, ils n'ont pas servi à faire de déterminations expérimentales.

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que les couleurs jaune ou rouge que prennent le soleil et la lune à mesure qu'ils s'avancent vers l'horizon, suivant la quantité de vapeur aqueuse qui se trouve en suspension dans l'air, tiennent à un défaut de transparence de l'atmosphère; mais souvent aussi, même lorsque le soleil est au zénith et que des nuages peu denses couvrent le ciel, le soleil semble également jaunâtre, rougeâtre ou pourpre; d'autres fois il reste blanc (1).

Il paraît cependant que les astres peuvent présenter d'autres couleurs. M. Forster (*Annales de physique et de chimie*, t. XVIII, p. 419) a observé dans le comté d'Essex, le 18 août 1821, entre neuf et dix heures du matin, que le soleil était environné de nuages légers et que son disque paraissait d'une couleur azur semblable à celle réfléchie par l'atmosphère dans un jour serein; le

(1) Il faut en outre faire cette remarque, qu'en général, lorsqu'on observe les corps par transparence, et entre autres certains corps bleus, à mesure que l'on augmente leur épaisseur et qu'ils tendent à devenir opaques, les rayons rouges sont ceux qui persistent le plus longtemps, et le corps, avant d'être opaque, paraît rougeâtre.

matin du même jour, des personnes qui avaient attiré l'attention de M. Forster sur ce phénomène, avaient remarqué que le disque solaire, dont la lumière était assez affaiblie par des nuages pour qu'on pût le regarder à l'œil nu, avait une teinte argentée telle, que quelques-unes le prirent pour un aérostat. Howard a aussi été témoin de ce fait, et, d'après lui, la teinte du soleil était celle de l'acier des ressorts de montre. Le même jour, à l'Observatoire de Paris, MM. Arago et de Humboldt avaient inscrit sur les registres que le soleil était tellement affaibli par d'épaisses vapeurs, qu'on pouvait le regarder à l'œil nu; cependant sa teinte était restée du blanc le plus parfait.

M. Babinet (*Comptes rendus*, t. VIII) a également observé deux fois le soleil bleu, et les recueils scientifiques en rapportent aussi d'autres exemples. Avant de chercher à donner l'explication de ce phénomène, il faudrait d'abord être certain que les observations ont été faites en isolant l'image du soleil de celle des corps voisins; car, sans cela, on pourrait peut-être supposer que la coloration est due à un effet de contraste, comme cela a lieu dans le cas des ombres colorées. M. Babinet pense que ce phénomène provient de l'interférence des rayons qui ont traversé les vésicules d'eau ou de vapeur avec les rayons qui ont traversé l'air seulement; mais, jusqu'à nouvel examen, nous nous abstenons d'émettre une opinion à cet égard.

SECTION II.

AURORE ET CRÉPUSCULE.

Le soir après que le soleil a quitté l'horizon, et le matin avant son lever, une partie de l'atmosphère éclairée par cet astre nous envoie de la lumière, de sorte que nous ne passons que peu à peu du jour à la nuit et de la nuit au jour; mais ce passage ne s'effectue pas sans que l'horizon et plusieurs parties du

ciel se colorent de vives nuances. Les effets lumineux du matin constituent le crépuscule du matin ou l'aurore, ceux du soir le crépuscule proprement dit.

La durée du crépuscule dépend non-seulement de la position géographique des localités, mais encore de l'état de l'atmosphère; ainsi, en Afrique, par un ciel très-pur, le crépuscule est très-court, tandis que dans des pays où le ciel est brumeux il dure plus longtemps. Il existe des lieux où, dans certaines saisons, le crépuscule du soir touche à celui du matin, et alors il n'y a pas de nuit. Au pôle, la lumière paraît un mois et demi avant que le soleil ne soit sur l'horizon, et un mois et demi après qu'il est disparu; d'où il suit que cette région n'a à proprement parler qu'une nuit absolue de trois mois et un jour de neuf mois, car il y a trois mois de crépuscule. Nous allons examiner rapidement les diverses conditions de ce phénomène.

§ I. — *Crépuscule du soir.*

Si, dans nos climats, par un jour serein, un observateur suit le mouvement du soleil et se trouve placé de manière à voir l'horizon autour de lui, il remarque alors les effets suivants : pendant tout le jour le ciel reste bleu, mais à mesure que le soleil s'approche de l'horizon occidental, cette portion de l'atmosphère commence à se colorer en jaune ou en rougeâtre, teinte provenant de l'épaisseur de la masse que les rayons traversent avant d'arriver à lui; vers le zénith, le ciel blanchit, puis la clarté augmente en approchant de l'horizon est ou oriental, à l'opposite du soleil.

Afin que l'on puisse mieux suivre ces divers effets, désignons par OA la masse sphérique de la terre (pl. I, fig. 10); soit A la position de l'observateur, AZ l'épaisseur de l'atmosphère, ou du moins la hauteur des particules d'air assez denses pour qu'elles puissent encore réfléchir les rayons lumineux ; soit BB' l'horizon, B se trouvant à l'ouest, B' à l'est, et le plan de la figure étant celui du cercle apparent que parcourt le soleil.

Lorsque le soleil arrive à l'horizon ouest en B, non-seulement la coloration jaune ou rougeâtre se maintient de ce côté, mais à l'est, en B', on aperçoit une teinte rougeâtre tirant quelquefois sur le rouge-feu, et qui atteint son maximum au moment où le soleil disparaît sous l'horizon. Cette coloration est due aux derniers rayons du soleil couchant qui traversent l'atmosphère suivant une longueur BB' plus de 25 fois plus grande que AZ. Suivant l'état de l'atmosphère, la teinte en B' varie du rouge au pourpre, de même que vers le soleil couchant en B la couleur offre toutes les nuances intermédiaires entre le jaune et le rouge foncé. Souvent cette teinte jaune s'étend jusqu'à une certaine distance dans le ciel, et se mélangeant avec le bleu atmosphérique, jette une teinte de vert sur une partie de la voûte céleste.

Si l'observateur continue à regarder le ciel à mesure que le soleil s'abaisse au-dessous de l'horizon, il voit apparaître vers l'orient B' un segment obscur, surmonté d'un arc lumineux se terminant par la teinte rouge dont nous venons de parler. Ce segment s'élève sur l'horizon oriental B'Z à mesure que le soleil s'abaisse au-dessous de B ; il est dû à l'ombre portée par la terre sur la partie de l'atmosphère qui est assez dense pour réfléchir irrégulièrement les rayons lumineux. Cet espace obscur a été nommé segment anti-crépusculaire ou simplement anti-crépuscule par Mairan (1). La teinte du segment obscur, qui est bleuâtre et pourprée, est due à l'éclairement de l'ombre par la lumière diffuse.

L'arc de l'anti-crépuscule est donc la ligne de séparation entre l'ombre portée par la terre et le bleu du ciel. Sa teinte, d'après Mairan, est blanchâtre, orangée, et enfin rougeâtre à sa partie supérieure.

Le point culminant du segment est situé en face du

(1) C'est ce physicien qui a appelé l'attention des observateurs sur ce segment obscur, remarqué d'abord par Functius en 1716, puis par Cramer. (Mairan, *de l'Aurore boréale*, page 400.)

soleil, et lorsque cet astre n'est encore que peu abaissé au-dessous de l'horizon occidental, la teinte rouge de l'orient se confond avec celle de l'occident. Si le ciel est serein, le zénith est bleu; mais si, dans la journée, le ciel a été blanchâtre, alors il offre à ce moment une teinte pourprée due à ce que les particules de vapeur vésiculaire réfléchissent aussi les rayons rouges qui nous viennent du soleil.

A mesure que le soleil continue à s'abaisser au-dessous de l'horizon, le crépuscule occidental s'abaisse également; sa couleur rouge devient plus foncée et plus nette. L'anti-crépuscule s'élève; son arc lumineux et coloré se détache du segment bleuâtre, qui devient bientôt grisâtre, et monte en s'affaiblissant jusque vers le zénith, où il est encore sensible lorsque l'air est très-pur; après sa disparition, la teinte grise règne au ciel, et la nuit est venue.

Quelquefois, dans des circonstances particulières, on observe d'autres colorations : ainsi l'on voit, après l'élévation de l'anti-crépuscule, une seconde coloration rose à l'orient. M. Kaemtz remarque que le phénomène est plus marqué lorsque des cumulus ou des cirro-cumulus légers flottent vers l'occident. Cet effet provient, d'après l'opinion de plusieurs observateurs, de ce que les parties éclairées en rouge par le crépuscule agissent comme centres lumineux, et, par leur réverbération, éclairent cette portion de l'atmosphère.

M. Necker de Saussure (*Annales de physique et de chimie*, t. LXX, p. 112), ayant souvent observé le crépuscule et la seconde coloration en rose de la chaîne du mont Blanc, lui donne une autre explication. Voici comment il décrit le phénomène tel qu'il l'a observé à Genève : Lorsque le soleil se couche à l'occident, on aperçoit d'abord vers l'orient les colorations crépusculaires mentionnées plus haut; vingt-trois ou vingt-quatre minutes après le coucher du soleil, l'ombre atteint le dôme de neige du Buet, élevé de 3075 mètres au-dessus du niveau de la mer et à 12 lieues $\frac{1}{4}$ de Genève; 3 minutes

après ou 27 après le coucher du soleil, l'ombre atteint le sommet de l'aiguille Verte à 4081 mètres d'élévation. Enfin le mont Blanc, qui reste éclairé le dernier et paraît briller d'une teinte orangée quelquefois rouge de feu, est obscurci environ 29 minutes après le coucher du soleil. La hauteur du mont Blanc est de 4810 mètres; cette montagne est à 15 lieues de Genève. A partir de ce moment, une teinte sombre est répandue sur ces cimes montagneuses; mais lorsque le segment anti-crépusculaire sombre s'est élevé, environ 5 minutes après l'obscurcissement du mont Blanc, ou 33 minutes après le coucher du soleil dans la plaine, alors les neiges du mont Blanc se colorent de nouveau, puis, peu à peu, les montagnes les plus rapprochées de l'observateur. Cette coloration secondaire est moins forte que la première, et diminue peu à peu jusqu'à ce que la nuit soit venue.

Suivant M. Necker de Saussure, la seconde coloration rose du mont Blanc commence par le bas de la montagne, puis gagne peu à peu le sommet à mesure que le segment obscur anti-crépusculaire s'élève par-derrière; alors cette coloration ne provient que du contraste qui existe entre l'illumination de la montagne et la coloration du ciel sur lequel elle se projette. En effet, au moment où la montagne paraît s'obscurcir, le rouge de l'anti-crépuscule colorant le ciel, la montagne se projette sur un fond éclairé; mais lorsque le segment obscur anti-crépusculaire s'élève sur l'horizon, le ciel est sombre et la montagne, se projetant sur un fond obscur, paraît briller de nouveau. D'après cela, le mont Blanc serait toujours éclairé; mais, sa teinte diminuant sans cesse, le second maximum de lumière proviendrait de ce que la montagne se projette à cet instant sur le fond noir du segment obscur anti-crépusculaire.

On peut objecter à cette hypothèse que les montagnes plus rapprochées et plus basses ne se colorent qu'après la cime élevée du mont Blanc, et que le retard de la seconde coloration est d'autant plus grand que les mon-

tagues sont plus près. M. N. de Saussure répond à cette objection que cette contradiction n'est qu'apparente, et que les montagnes plus rapprochées citées plus haut, en raison de leur proximité ont une hauteur angulaire apparente plus considérable que le mont Blanc, et se projettent par conséquent sur des portions du ciel plus élevées au-dessus l'horizon, sur lesquelles le segment sombre anti-crépusculaire ne parvient que plus tard. Cette explication paraît fort plausible, et il est nécessaire de faire de nouvelles observations pour décider entre les deux manières de rendre compte de la deuxième coloration rouge crépusculaire.

L'arc crépusculaire étant l'arc rougeâtre de l'horizon B lorsque le soleil s'abaisse au-dessous de ce plan, et l'arc anti-crépusculaire la courbe qui limite le cône d'ombre projeté sur l'atmosphère, si le soleil est en S''', la limite de cette courbe est en C, telle que S'''C soit tangent à la terre, abstraction faite de la réfraction atmosphérique. Lorsque le crépuscule disparaît, on admet, en général, que le soleil est abaissé de 17 ou 18° au-dessous de l'horizon; mais dans des circonstances favorables, après le crépuscule, on voit à l'occident, vers B, une lueur blanchâtre qui s'élève quelquefois assez haut dans le ciel. Cette lueur, d'après M. Biot, n'est pas due à l'illumination des particules aériennes BC par les rayons solaires directs, mais à une réverbération provenant de l'illumination de l'atmosphère par la partie S'''BC éclairée directement par le soleil. Ainsi la partie de l'atmosphère S'''BC, à mesure que le soleil s'abaisse au-dessous de l'horizon, agit comme corps lumineux et donne naissance à un second espace crépusculaire, l'espace BC coloré de diverses nuances et dont nous avons parlé, étant le premier espace crépusculaire. On peut également supposer un troisième et un quatrième espace crépusculaire; mais, d'après la faible clarté blanchâtre du second crépuscule, il est peu probable que les autres puissent être sensibles.

Il ne paraît pas que dans nos climats, en plaine, on puisse voir le deuxième crépuscule, mais, sur les mon-

tagnes, on peut l'apercevoir; ainsi, sur le col du Géant, de Saussure dit l'avoir observé avec une hauteur de 30°, lorsque le soleil était à 22° sous l'horizon.

Toutes choses égales d'ailleurs, le crépuscule se termine donc en général lorsque le soleil est à 17° ou 18° au-dessous de l'horizon; mais les conditions physiques du phénomène étant très-variables suivant les saisons, et la teinte de l'air et des nuages dépendant de l'état de l'atmosphère, il est impossible de préciser sa durée. Cependant, pour montrer comment le crépuscule se manifeste dans nos climats, nous rapporterons les résultats des observations faites sur le Faulhorn, du 17 juillet au 5 août 1841, par MM. Bravais et Martins. La coloration rose, pour un observateur placé dans ces conditions, commence avant le coucher astronomique apparent du soleil, lorsque le centre de cet astre est environ 1° de hauteur angulaire au-dessus de l'horizon; l'arc anti-crépusculaire s'élève au moment du coucher apparent, passe au zénith après 25′ ou 30′, puis met le même temps pour atteindre l'horizon occidental. La coloration rose peut se prolonger au delà du coucher de cet astre, comme nous l'avons vu plus haut; alors, suivant ces observateurs, c'est une réverbération de la première coloration. D'après les calculs de M. Bravais, le pouvoir de réfléchir les rayons rouges qui teignent l'atmosphère au coucher du soleil n'appartient aux couches atmosphériques que jusqu'à 10000 mètres; cette limite est plus basse vers les cercles polaires et plus élevée vers l'équateur.

Les observations des limites des courbes crépusculaires se font mieux sur les montagnes que dans les plaines; on peut même, par les nuits sereines, suivre la rotation de la courbe crépusculaire qui sépare le premier crépuscule du second.

Lorsqu'il y a beaucoup de vapeur condensée dans le jour, que le ciel paraît mat, alors le crépuscule est long. Si les vapeurs sont fort élevées et les couches inférieures de l'atmosphère assez pures, le crépuscule est également

très-long : c'est ce que l'on a remarqué en 1831. Dans l'intérieur de l'Afrique, où l'air est très-pur, le crépuscule est en général fort court, et la nuit succède promptement au coucher du soleil. Le crépuscule est très-court entre les tropiques; il dure un quart d'heure au Chili et, d'après M. de Humboldt, quelques minutes à Cumana.

§ II. — *Aurore.*

L'aurore ou le crépuscule du matin présente les mêmes effets que le crépuscule du soir, mais dans un ordre inverse, puisque le soleil se lève sur l'horizon : nous ne pourrions donc que répéter ce que nous venons de dire; mais pour montrer la marche du phénomène suivant la position du soleil, nous ne pouvons mieux faire que de rapporter les observations de M. Bravais sur le Faulhorn, à 2683 mètres au-dessus du niveau de la mer.

1° Le soleil étant à 12° au-dessous de l'horizon, 48 minutes avant le lever du soleil. — A l'orient, une bande rougeâtre ou orangée, dont la hauteur est à peu près 0. On ne distingue encore aucune teinte au-dessus de cette bande orangée; la hauteur de la courbe crépusculaire est de 7°. Le fuseau compris entre ces deux arcs est d'un bleu blanchâtre plus clair que le reste du ciel.

2° Le soleil étant à 10° au-dessous de l'horizon. — La hauteur de la zone orangée est de 1° au-dessus; la jaune commence à paraître, et sa hauteur atteint 2° 30′ dans le vertical du soleil; on ne voit pas encore de vert. La hauteur de la courbe crépusculaire est de 12°.

3° Le soleil étant à 8° au-dessous de l'horizon. — La partie teinte de rouge s'étend depuis l'horizon jusqu'à 1° 15′. Au-dessus, teinte jaune jusqu'à 3° 10′. Le vert commence à paraître sur le jaune; la bande verdâtre ne dépasse guère 5° de hauteur. Au-dessus, nuance bleuâtre faible jusqu'à 25°, où se trouve la limite du crépuscule.

4° Le soleil étant à 6° au-dessous de l'horizon. — L'élévation des zones orangée et jaune n'a pas changé.

La teinte verdâtre règne jusqu'à une hauteur de 7°. La courbe crépusculaire gagne rapidement le zénith; sa hauteur est de 70°. Le ciel, vers le couchant, n'offre encore aucune trace d'éclairement.

5° Le soleil étant à 4° au-dessous de l'horizon. — L'élévation des zones orangée et jaune n'a pas changé. La zone verdâtre atteint 12°. Au-dessus d'elle commence à se montrer une zone purpurine, du moins si les circonstances sont favorables; elle ne persiste que pendant quelques minutes, et se forme après le passage de la courbe crépusculaire par le zénith. Le soleil est alors entre 5° et 3° au-dessous de l'horizon; jamais elle n'a lieu ni avant ni après. C'est vers 25° de hauteur que cette teinte rosée a son maximum d'intensité, et elle ne dépasse pas 45°. On n'observe pas de liseré jaunâtre qui la sépare de la région verdâtre située au-dessous. La teinte du zénith est bleue, quelquefois même légèrement teintée de verdâtre à l'horizon occidental. L'arc anti-crépusculaire se dessine vers 10° de hauteur; il n'offre pas de teinte rouge bien ardente, mais un ton bleuâtre sombre, avec une nuance purpurine plus ou moins prononcée. En dessous, le ciel paraît plus clair.

6° Le soleil étant à 2° au-dessous de l'horizon. — Le rouge oriental commence à jaunir; sa hauteur reste la même. La limite supérieure de la zone jaunâtre est toujours égale à 3° ou 3° 15'. De là jusqu'à 18° de hauteur, coloration verte plus intense que dans les périodes précédentes; la teinte purpurine secondaire a complétement disparu. A l'horizon occidental, la hauteur de l'arc anti-crépusculaire est de 3°; la coloration en rouge s'étend de 3° jusque vers 15° de hauteur; le rouge offre souvent une teinte violâtre ou du moins purpurine. Au-dessous de l'arc anti-crépusculaire, on n'a pu découvrir le liseré blanc-jaunâtre signalé par M. Kaemtz; mais le bleu du ciel y paraît faiblement vert, probablement par un effet de contraste. Au-dessus du rouge règne le bleu ordinaire sans autres nuances intermédiaires perceptibles.

7° Le soleil étant à l'horizon. — Le soleil est levé, son disque et les portions voisines atmosphériques offrent assez souvent une teinte jaunâtre et plus souvent encore orangée; la bande orangée qui stationnait à l'horizon oriental s'efface : cette disparition, lorsqu'elle a été la plus tardive possible, s'est faite lorsque le soleil a été à 1° ou 1°,5 au-dessus de l'horizon. Le jaune persiste jusqu'à 3° de hauteur; de là, jusqu'à 22°, le verdâtre est bien marqué. Le zénith est bleu. A l'occident, l'anti-crépusculaire a gagné l'horizon; la teinte rouge s'élève jusqu'à 4° ou 5° de hauteur. Le jaune, qui a commencé à paraître au-dessus lorsque le soleil était en arc à 1° au-dessous de l'horizon, s'élève maintenant jusqu'à 6° ou 7° de hauteur. Au-dessus du jaune, un peu de verdâtre commence à paraître.

8° Le soleil étant à 2° au-dessus de l'horizon. — Le rouge a entièrement abandonné l'horizon oriental, le jaune seul subsiste et s'affaiblit de plus en plus; la teinte verte surmonte le soleil et s'étend jusque vers 25° de hauteur; le zénith est bleu. A l'occident, l'arc anti-crépusculaire a complétement disparu; le jaune persiste encore, sa limite supérieure ne dépasse pas 3°. Le vert, qui le surmonte, offre son maximum d'intensité vers 5° ou 6°, de là il s'étend jusque vers 10° de hauteur ou même au delà. Il est difficile de mesurer la hauteur du point de partage de cette zone d'avec le bleu de la partie zénithale du ciel.

9° Le soleil étant à 4° au-dessus de l'horizon. — Le jaune a lui-même disparu; mais le vert subsiste encore assez fréquemment, surtout dans la partie du ciel opposée au soleil : ce dernier vestige de la coloration crépusculaire s'efface de plus en plus.

Cette succession de couleurs indique seulement ce qui se passe dans le vertical du soleil. Dans les régions latérales, en général, les lignes de démarcation entre les teintes s'abaissent vers l'horizon; mais, cependant, cette règle souffre des exceptions : le rose y est moins intense; mais quelquefois le vert l'emporte sur le vert des autres

parties du ciel, du moins quelques instants avant le lever du soleil.

Il en est de même pour l'aurore comme pour le crépuscule du soir : la durée du phénomène dépend de la hauteur de celles des particules d'air qui sont assez denses pour envoyer de la lumière réfléchie, et varie avec l'état de l'air; elle est, en général, plus grande pour le crépuscule que pour l'aurore.

§ III. — *Apparences crépusculaires et pronostics.*

Nous avons parlé plus haut des principales teintes dont se colore l'atmosphère lorsque le soleil disparaît ou s'élève au-dessus de l'horizon; ces teintes jaunes et rouges proviennent du passage de la lumière à travers des couches d'air mêlé de vapeurs suffisamment denses, et la teinte verte du mélange de jaune et de bleu céleste. Lorsque le ciel est nuageux au coucher du soleil, alors on peut apercevoir les nuages colorés eux-mêmes par les rayons jaunes ou rouges du soleil couchant s'ils sont peu épais, ou bien leurs bords seulement s'ils sont très-denses; dans le dernier cas, ils peuvent présenter une teinte violâtre provenant du mélange de gris bleuâtre avec le vert dû au contraste du rouge. On conçoit, du reste, combien d'effets de lumière doivent quelquefois se manifester dans des masses nuageuses inégalement denses éclairées par les rayons colorés du soleil couchant et par les diverses parties de l'horizon au moment où le soleil disparaît aux yeux de l'observateur.

On remarque quelquefois des colonnes lumineuses nommées *rayons crépusculaires*, qui sont dues à l'illumination de l'atmosphère, lorsque des cumulus ou des cumulo-status flottant dans l'air sont interrompus par des éclaircies, et que le soleil luit à travers; on pourrait aussi bien dire que ces rayons sont dus à des cylindres d'ombres projetés dans l'atmosphère éclairée. Si le soleil est peu élevé sur l'horizon, les rayons crépusculaires partent du soleil; s'il est au-dessous de l'horizon, ils s'élèvent dans l'atmosphère sous forme d'arcs de grands

cercles, qui ne semblent divergents que par un effet de perspective, et qui se couperaient sur une ligne menée de l'observateur au centre du soleil. Quelquefois ils se montrent à l'opposite du soleil, et convergent vers le point diamétralement opposé à cet astre.

Les rayons crépusculaires, d'après certaines personnes, sont un pronostic de pluie; on le conçoit jusqu'à un certain point, car ce phénomène se montre surtout vers le soleil couchant, à l'instant où, dans les beaux jours, les nuages ont presque disparu ou sont sur le point de disparaître. C'est donc lorsque l'atmosphère est chargée de vapeurs que les conditions les plus favorables à la production de ces rayons se trouvent réunies; alors il y a grande chance de pluie.

Nous avons dit, dans le paragraphe précédent, que, si le ciel est chargé de vapeurs ou de légers cumulo-stratus, alors, au moment où la teinte rouge de l'anti-crépuscule apparaît, non-seulement l'horizon est rouge à l'orient et à l'occident, mais encore presque tout le ciel se trouve coloré de cette manière. Lorsque des cirrus légers flottent dans l'atmosphère, les vapeurs sont élevées et les crépuscules sont très-longs; cet état étant analogue à celui qui précède les orages, les longs crépuscules se lient quelquefois à la production de ces météores.

Les apparences du crépuscule et des diverses nuances qui proviennent de la présence des vapeurs et des nuages peuvent quelquefois nous donner des indices sur l'état du ciel le lendemain, et servir de pronostics: ainsi un ciel serein, un crépuscule clair, sans nuage et dans un ciel orangé, est un signe de beau temps. Des couleurs vives plus ou moins fortes, tenant à la présence des vapeurs, suivant le moment où elles se montrent, peuvent présager la pluie avec grande probabilité. Ces faits, qui sont connus depuis longtemps, surtout des cultivateurs, ne sont guère plus nombreux aujourd'hui qu'autrefois, et ont été résumés dans plusieurs ouvrages; nous indiquerons seulement les remarques suivantes, que M. Kaemtz cite dans sa *Météorologie*.

Lorsque le ciel est bleu, et qu'après le coucher du soleil l'occident devient pourpre, on peut assurer que le temps sera beau le lendemain, surtout si l'horizon semble couvert d'une légère fumée. Un crépuscule avec des nuages isolés, colorés en rouge, après la pluie, annonce aussi le beau temps. Mais lorsqu'à l'occident on a une teinte jaunâtre qui s'étend assez loin dans le ciel, alors on peut conjecturer qu'il pleuvra le lendemain. On peut s'attendre à de la pluie et à des orages, lorsque le soleil étant d'un blanc éclatant, se couche au milieu d'une lumière blanchâtre; on a encore plus de raison pour craindre la pluie lorsque des cirrus, qui donnent une teinte blafarde au ciel, sont plus foncés à l'horizon, et que l'on voit un rouge grisâtre au milieu duquel on aperçoit des portions rouge foncé qui permettent à peine de distinguer le soleil : on comprend, en effet, que dans ce cas la vapeur vésiculaire est très-abondante.

Les pronostics que fournit l'aurore sont un peu différents. Si l'aurore est grisâtre, elle présage le beau temps. Cela résulte de ce que cette teinte est due aux stratus qui cèdent à l'action du soleil levant, tandis que le crépuscule gris provient de cirrus qui s'épaississent la nuit et annoncent la pluie le lendemain. L'aurore très-rouge est un signe de pluie, car alors il y a assez de vapeur condensée pour donner cette teinte aux rayons du soleil levant, et il y a des chances pour que, dans le courant de la journée, les colonnes gazeuses ascendantes forment des couches épaisses de nuages.

Hauteur de l'atmosphère, déduite du crépuscule.— Nous avons dit, en parlant de l'atmosphère, que l'épaisseur de la couche gazeuse au-dessus de la terre n'était pas connue avec certitude; en effet, d'après la diminution de densité, à 1 lieue (de 4000 mètres), la densité de l'air est moins de $\frac{1}{10}$ de sa valeur à la surface, et, suivant toute probabilité, l'air a encore une densité sensible jusqu'à 16 ou 20 lieues.

Le crépuscule dépendant de l'illumination des particules d'air, il est évident que son étendue est en rela-

tion avec celle des couches gazeuses qui sont encore assez denses pour réfléchir les rayons lumineux.

Lorsque l'observateur, situé en A (planche I, fig. 10), observe le crépuscule ou l'aurore, la hauteur de l'arc crépusculaire BC dépend de la position des dernières particules C d'air qui sont assez denses pour réfléchir les derniers rayons solaires S‴C tangents à la surface terrestre. Mais la hauteur de cet arc ne peut être connue avec certitude; car, s'il en était ainsi, en suivant le crépuscule depuis le commencement jusqu'à la disparition de la courbe crépusculaire C au-dessous de l'horizon, et mesurant à chaque instant la hauteur BC et l'abaissement du soleil, on devrait toujours trouver la même hauteur pour l'atmosphère : or il n'en est pas ainsi. Au moment où la courbe disparaît, comme cela résulte des observations de plusieurs météorologistes, le soleil est à 17 ou 18° au-dessous de l'horizon; ce qui donne alors 60000 mètres environ, ou 15 lieues, à la hauteur des dernières couches d'air qui peuvent réfléchir la lumière; si l'on calcule ensuite la hauteur de l'atmosphère d'après les mesures qui ont précédé, on trouve que cette hauteur va en croissant à mesure que l'astre s'abaisse au-dessous de l'horizon, et atteint son maximum lorsque le soleil est à 17° ou 18° au-dessous de ce plan. Il est probable que, lorsque le soleil n'est pas encore très-bas, le ciel étant éclairé, on ne saisit pas bien les dernières traces de l'arc crépusculaire, et que cet arc s'étend un peu plus loin qu'on ne le voit réellement; alors, quand le soleil est à 17 ou 18°, la portion de l'arc que l'on peut apercevoir est plus considérable. D'après cela, l'atmosphère doit s'étendre encore plus loin que nous ne le supposons, car la courbe que nous voyons disparaître à l'horizon ne doit pas être la dernière limite de l'ombre projetée par la terre sur les dernières couches de l'atmosphère.

Cette méthode de calcul, pour déterminer l'épaisseur de la couche d'air qui nous environne, a été employée par Alhazen, auteur arabe qui vivait dans le XIe siècle,

par Vitellon, son contemporain, par Ticho-Brahé, Képler, et plusieurs astronomes des XVIe et XVIIe siècles, puis par Lahire en 1713, et enfin par les météorologistes actuels; quoique rationnelle, elle ne donne que des indications assez vagues.

M. Biot, en supposant que l'arc que l'on voit disparaître à l'horizon, au moment où le soleil est à 17 ou 18° au-dessous de ce plan, appartienne au 2e ou 3e crépuscule, a trouvé pour les hauteurs de l'atmosphère :

1er crépuscule	 58916	mètres.
2e —	 10197	
4e et 3e —	 6392	

Cette 3e hauteur est moindre que celle à laquelle s'est élevé M. Gay-Lussac, en aérostat; il y a donc incertitude quant aux limites des espaces crépusculaires. Il est probable toutefois que la valeur de 60 à 80 mille mètres, donnée à l'atmosphère, n'est pas au-dessous de la vérité, et que la courbe crépusculaire appartient au 1er crépuscule.

On voit qu'il n'y a rien de certain à ce sujet; on peut seulement dire qu'à 20 lieues l'air est déjà excessivement rare et n'a pas une densité appréciable. Il peut se faire cependant que l'atmosphère s'étende encore au delà, mais en quantité à peine sensible, et que ce soit dans ces régions où se trouve l'air dans un tel état de raréfaction que se forment les aurores boréales.

SECTION III.

RÉFRACTION.

---

§ Ier. — *Réfraction astronomique.*

L'atmosphère, comme tous les corps gazeux, agit par réfraction sur les rayons lumineux, de sorte que les rayons solaires sont déviés de leur route lorsqu'ils traversent l'air. La densité des couches atmosphériques

n'étant pas la même, et diminuant à mesure que l'on s'éloigne de la terre, la trajectoire lumineuse n'est pas une ligne droite, mais bien une ligne courbe, et cette ligne s'infléchit de plus en plus à mesure qu'elle s'approche de la surface de la terre. L'effet de cette réfraction, appelée réfraction astronomique, est de nous faire paraître les astres plus élevés sur l'horizon qu'ils ne le sont en réalité.

La réfraction est nulle quand l'astre est au zénith, et augmente lorsqu'il s'approche de l'horizon. Les astronomes ont cherché à calculer l'effet de cette réfraction, afin de connaître la position exacte des astres, d'après leur position apparente. Pour donner une idée de la valeur de la déviation des rayons lumineux, et de la position apparente des astres, nous dirons qu'à l'horizon l'effet produit est à peu près de $\frac{1^\circ}{2}$: or, un demi-degré étant à peu près la dimension angulaire du soleil, lorsque cet astre se couche et que son bord supérieur atteint réellement l'horizon, nous ne devrions plus le voir; cependant l'effet de la réfraction nous le montre encore tout entier, son bord inférieur étant seulement tangent à l'horizon. De même nous voyons le soleil se lever alors que réellement, s'il n'existait pas d'air, il serait caché sous l'horizon.

Un des effets produits par la réfraction astronomique, c'est que, les points des disques solaire et lunaire étant tous relevés sur l'horizon, mais inégalement, ces astres doivent paraître légèrement aplatis dans le sens vertical. Enfin, très-près de l'horizon, comme nous allons le voir ci-après, les effets de réfraction peuvent se compliquer des phénomènes produits par l'inégale densité des couches atmosphériques inférieures; la forme des objets ou des astres est alors fort altérée.

§ II. — *Mirage.*

Les physiciens, les astronomes, et surtout les marins, ont observé depuis longtemps que des objets vus très-près de l'horizon, à l'aide de rayons lumineux qui rasent

par conséquent la terre, présentent souvent deux images, l'une directe, l'autre renversée, et même un plus grand nombre dans quelques circonstances. Les marins ont désigné ce phénomène sous le nom de *mirage*, pour exprimer que les objets sont vus comme s'ils étaient réfléchis par des miroirs.

Ces apparences ont exercé la sagacité des observateurs, qui ont tous indiqué qu'elles étaient dues à des différences de densité, mais sans préciser les conditions nécessaires à leur accomplissement. Il paraît que Picard et les premiers Cassini ont signalé, dans leurs travaux, quelques-uns de ces phénomènes.

Les effets de mirage les plus apparents et qui ont surtout attiré l'attention, sont ceux qui se produisent dans la basse Égypte et dont nos soldats ont été frappés lors de l'expédition de 1798. Lorsque les plaines sablonneuses de cette contrée ont été fortement échauffées par les rayons solaires, alors elles échauffent les couches d'air contiguës; si l'air est agité, l'image des objets situés à une certaine distance est mal définie, à cause du mouvement ondulatoire qui existe dans sa masse : tels sont les effets qui se manifestent lorsque l'on regarde des objets à travers l'air chaud qui sort d'une cheminée; mais si le vent ne souffle pas, et que l'air soit calme au-dessus de ces plaines, non-seulement les objets situés à une certaine distance présentent leur image directe, mais encore ils donnent une image renversée, au-dessous du sol, comme s'ils se réfléchissaient sur une surface liquide. Les soldats, dévorés par la soif et séduits par l'illusion, croyant être peu éloignés d'une nappe d'eau, couraient vers cette eau imaginaire; le rivage fuyant devant eux leur laissait voir, à la place de l'eau, un sol aride et desséché. Tel est le phénomène du mirage dont Monge a donné l'explication suivante :

Soit MN (pl. I, fig. 11) le sol échauffé, qui a élevé la température des couches d'air en contact avec lui; l'air augmente donc de densité, à mesure que l'on s'éloigne du sol, jusqu'à une certaine hauteur. Un rayon, tel que A*a*, pé-

nétrant d'une couche plus dense dans une autre couche moins dense, s'écarte de la normale et s'infléchit vers le sol; cette inflexion augmente de plus en plus en a, a', a'', à mesure que ce rayon pénètre dans des couches moins denses; il finit par se réfléchir totalement en P, de façon à parvenir à l'œil d'un observateur O, après avoir décrit une trajectoire OPA, convexe vers le sol échauffé MN. Alors l'observateur O voit l'image directe AB dans la direction AO, et l'image réfléchie A'B'; car tous les rayons émanés de A, et qui seraient très-inclinés à l'horizon, éprouvent la même action.

Cet effet est analogue au phénomène de réflexion intérieure ou de réflexion totale, qui a lieu dans les milieux réfringents ordinaires toutes les fois que la lumière passe d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent; il arrive un moment où le rayon Aa tombe sous l'angle limite sur une couche d'air inférieure, et alors il éprouve la réflexion complète. On conçoit d'après cela comment les objets semblent réfléchis par une surface horizontale; quant à l'apparence d'une surface d'eau, Monge l'a bien expliquée en disant que toutes les parties de l'atmosphère près de l'horizon, donnent aussi lieu à des images renversées, et se réfléchissent autour de ces objets terrestres comme cela aurait lieu sur une eau tranquille. (Voir, pour la théorie, un travail de M. Biot, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1809.)

On est peut-être étonné de ce que l'air puisse être plus dense à une certaine hauteur qu'à la surface du sol; or si l'on remarque que la densité de l'air n'est pas seulement proportionnelle à la pression des couches supérieures, mais encore qu'elle est en raison inverse du module de dilatation, alors on se convaincra facilement que l'élévation de température peut être telle que l'augmentation d'élasticité qui en résulte puisse compenser l'augmentation de pression provenant de ce que l'on considère des couches plus voisines du sol.

On reproduit assez bien les phénomènes de mirage en chauffant une plaque de tôle, et examinant obliquement,

et parallèlement à la surface de la plaque, l'image d'un objet situé au delà. D'après Wollaston, on peut aussi avoir des apparences analogues en superposant deux liquides de densités différentes; par exemple, de l'acide sulfurique et de l'eau.

Les circonstances énoncées plus haut ne sont pas les seules dans lesquelles on ait des effets de mirage; sur mer et sur les rivières, ces phénomènes sont fréquents, mais il faut, comme on pense bien, deux conditions essentielles : calme dans l'air; élévation de température plus considérable à la surface de l'eau qu'à une certaine hauteur.

On observe aussi des apparences particulières qui tiennent à des circonstances locales, et qui sont produites par les inflexions des trajectoires lumineuses, provenant de la différence de densité ou plutôt de pouvoir réfringent des couches d'air contiguës; ainsi, dans certains cas, les objets paraissent comme suspendus en l'air; leur image est droite, sans être accompagnée, du moins en apparence, d'une image renversée. M. Biot, qui a donné la théorie de ces phénomènes, a montré que, dans cette circonstance, on devait avoir une seconde image renversée mais tellement aplatie qu'elle était réduite à des dimensions infiniment petites. On désigne ce phénomène sous le nom de *suspension*, pour le distinguer de celui du mirage.

On est témoin quelquefois de déviations latérales des objets et d'images situées au-dessus et renversées. Enfin, on ne peut douter que le phénomène connu sous le nom de *fata morgana* à Naples et sur les côtes de Sicile, ne soit une espèce de mirage : à certains moments, on aperçoit sur le bord de la mer, dans l'air, des images de palais, de colonnes, de ruines qui se déplacent et changent d'aspect à chaque moment. Ces divers effets tiennent uniquement à des différences de température entre les couches d'air.

Lorsque les rayons lumineux viennent de l'horizon, les effets de la réfraction atmosphérique peuvent se com-

pliquer de phénomènes de mirage et de suspension. Les apparences que M. Biot a observées et calculées sont dans ce cas : souvent quand on observe avec un télescope des objets situés vers l'horizon, on voit des images représentant des lambeaux de l'horizon se détacher, flotter dans l'air, et retomber. M. Biot, un jour, en examinant une lumière placée à une assez grande distance, aperçut non-seulement l'image directe, mais bientôt une image renversée, puis il en vit deux, trois, quatre et même davantage qui paraissaient ou disparaissaient sans qu'il y eût rien de déterminé; elles étaient dans le sens vertical de la lumière. Ce phénomène de mirages multiples peut se comparer à celui des images qui se font entre deux glaces parallèles.

Plusieurs observateurs prétendent que le mirage est précurseur d'une tempête, car l'air étant plus chaud près du sol qu'à une certaine hauteur indique un état anomal de l'atmosphère, et le calme étant nécessaire à la production du mirage, lorsque celui-ci a lieu, il peut y avoir subséquemment des déplacements d'air et des tempêtes.

§ III. — *Arc-en-ciel.*

L'arc-en-ciel est le phénomène lumineux que l'on observe si fréquemment lorsqu'un observateur, se trouvant à une certaine distance d'un nuage qui déverse de l'eau, est situé entre le soleil et les gouttes de pluie. C'est donc dans le passage de la lumière à travers les gouttes d'eau qui tombent qu'il faut chercher la cause de ce brillant météore.

On est souvent témoin d'un phénomène analogue, mais se produisant sur une plus petite échelle : nous voulons parler des portions d'arcs que l'on aperçoit lorsqu'on est placé près d'un jet d'eau ou d'une cascade entre le soleil et les gouttes d'eau qui retombent. Dans ce cas, comme dans la production de l'arc-en-ciel, c'est simplement la réfraction de la lumière à travers les petites

sphérules liquides qui nous donne la représentation brillante de toutes les couleurs du spectre.

L'arc-en-ciel principal que l'on voit le plus habituellement est tel que le rouge est en dehors et le violet en dedans; mais très-souvent on aperçoit un second arc, plus grand que celui-ci, moins lumineux, et qui est disposé de façon que les couleurs sont dans un ordre inverse : le violet est en dehors et le rouge en dedans. Ces arcs sont concentriques, et leur centre passe par la ligne qui joindrait le soleil à l'observateur, cette ligne étant prolongée jusqu'au nuage. Quelquefois on aperçoit des arcs surnuméraires, dont il sera question plus loin.

Il paraît que le premier qui ait expliqué l'arc-en-ciel, de la manière dont nous le concevons, et qui ait fait voir que ce phénomène est dû à la lumière réfléchie dans le fond des gouttes d'eau, est un archevêque nommé Antonio de Dominis, qui publia un traité *De radiis lucis et iride*, en 1611; cependant la cause de ce météore avait été entrevue avant lui. Descartes vint ensuite et rectifia, puis compléta cette explication; enfin Newton montra que les observations s'accordaient avec les mesures déduites des déterminations sur les indices de réfraction correspondant aux divers rayons lumineux. Nous allons indiquer rapidement les circonstances nécessaires à production de ce phénomène.

Lorsqu'on fait tomber un faisceau de rayons SA sur une bouteille sphérique pleine d'eau (pl. I, fig. 12), une partie des rayons pénètre dans l'intérieur suivant AB, et l'autre est réfléchie sur le verre en A; la portion AB, qui a pénétré dans l'intérieur de la sphère en s'infléchissant suivant les lois de la réfraction, tombe de nouveau en B sur la surface du verre; une partie de AB se réfléchit en BC, et l'autre ressort de la sphère en BS'; mais, comme dans le trajet SABS', une portion des rayons se sont déviés de leur route primitive SA par la réfraction, alors la sphère agit sur eux comme un prisme d'eau qui serait formé par les plans tangents AP, BP, et si

l'on place sur la route de BS′ un carton blanc, on reçoit l'image d'un spectre solaire, les rayons de différente couleur étant inégalement réfrangibles. En suivant la partie du faisceau lumineux qui s'est réfléchie en B, on la voit se diviser encore en deux en C, et donner lieu, de même que précédemment, à des rayons réfractés et colorés suivant CS″, et à des rayons réfléchis intérieurement en C. Ainsi à chaque nouvelle incidence du faisceau réfléchi intérieurement une portion de la lumière ressort de la sphère, et l'intensité de ce faisceau diminue à chaque réflexion; les spectres formés en S′, S″, S‴, etc., doivent donc être de plus en plus faibles et devenir insensibles après plusieurs réflexions.

Lorsque les rayons solaires tombent sur les gouttes de pluie, il se passe un phénomène analogue; mais comme l'arc-en-ciel n'est aperçu que lorsque l'observateur est situé entre le nuage et le soleil, ce ne sont pas les rayons tels que BS′ qui ressortent de l'autre côté des sphères d'eau à l'opposé du foyer lumineux S qui peuvent engendrer le météore, mais les rayons tels que CS″ ou DS‴, etc., qui ont au moins subi une réflexion intérieure.

Soient donc OA (pl. I, fig. 13), une goutte d'eau sphérique; SA un rayon solaire incident qui se réfracte en AB, se réfléchit en BC, et ressort après cette seule réflexion en CD. D'après la régularité de la figure, en menant OA, OC, ces deux lignes doivent être normales à la surface sphérique en A et C. Si l'on prolonge SA et DC, ces deux lignes se rencontrent en E sur le prolongement de OB.

Faisons la déviation DES = D, soient i et r les angles d'incidence et de réfraction OAE et OAB. On a évidemment OBA = OAB, et comme OBA = BAE + BEA,

on a $$r=(i-r)+\frac{D}{2}$$

ou $$D=4r-2i=2(2r-i).$$

Or i et r sont liés par la loi de Descartes :

$$\sin i = n \sin r,$$

Et comme on démontre que DES est susceptible d'un maximum quand $\cos^2 i = \frac{n^2 - 1}{3}$, cela signifie que pour ce maximum, les rayons situés très-près de SA ont la même déviation ; ainsi dans cette incidence i déterminée par $\cos^2 i = \frac{n^2 - 1}{3}$, les rayons voisins ressortent parallèles. Cela n'a lieu que dans cette seule position.

Il résulte de là, que le soleil étant en S, et la goutte d'eau restant à sa place, l'œil de l'observateur tout autour de CD, n'aurait qu'une faible impression de lumière diffuse; mais en D, dans la direction CD, il recevrait une plus forte impression que tout autre part; les rayons parallèles SA qui se réfléchissent en B et ressortent en CD, sont nommés rayons efficaces.

Pour appliquer ce qui précède à l'eau, Newton a donné aux indices de réfraction n des rayons rouges et violets les valeurs suivantes :

Rayons rouges.	Rayons violets.
$n = \frac{108}{81}$,	$n = \frac{109}{81}$.

En calculant les incidences et les déviations correspondant au maximum ou aux rayons efficaces, on aura d'après ces valeurs :

Rayons rouges.	Rayons violets.
$i = 59^\circ\ 24'$	$i = 58^\circ$
$D = 42^\circ\ 2'$	$D = 40^\circ\ 17'$.

Ainsi un faisceau de rayons voisins pour ces valeurs de i, pourra être efficace en sortant d'une goutte d'eau et produire une impression sensible sur l'œil de l'observateur, tandis que tous les rayons qui tomberont sous d'autres incidences iront en divergeant, et ne donneront lieu à aucun effet.

Considérons d'abord les rayons rouges, et pour plus de simplicité, supposons le soleil à l'horizon en S (fig. 14);

soit SP une horizontale, O la position de l'observateur ; menons une ligne OR telle que POR $= 42^\circ\ 2'$; cette ligne rencontrera des gouttes de pluie, et en imaginant qu'elle tourne autour de OP, elle engendrera une surface conique, laquelle coupera un plan vertical suivant un cercle. Toutes les gouttes d'eau rencontrées par cette ligne OR recevront les rayons du soleil horizontalement dans la direction S'R, et si l'on considère le faisceau qui donne l'incidence maximum $59^\circ\ 24'$, ce faisceau reviendra en RO vers l'observateur et lui donnera la sensation du rouge. Ce que l'on dit du soleil s'applique à tout son disque, et l'œil verra tout autour de OP une bande rouge dont la largeur sera le diamètre apparent du soleil ou à peu près 30'.

D'après les valeurs relatives à la lumière violette, on a $D = 40^\circ\ 17'$; en menant OV telle que VOP $= 40^\circ\ 17'$, il est clair que l'œil verra dans cette direction OV un arc violet V de 30' de largeur, et entre OR et OV, on apercevra toutes les couleurs du prisme.

La largeur de la bande VOR sera de $42^\circ\ 2' - 40^\circ\ 17' +$ le diamètre apparent du soleil 30', c'est-à-dire, $2^\circ\ 15'$. Ces mesures ont été prises directement et trouvées exactes.

Le second arc-en-ciel est aussi facile à expliquer que le premier. Les rayons qui donnent lieu à cet arc sont ceux qui ont été réfléchis deux fois dans l'intérieur des gouttes d'eau. Soit OA une goutte sphérique de pluie (fig. 15); les rayons incidents, tels que SA, qui se réfléchissent en B et B' avant de ressortir en C pour venir vers l'observateur D, sont ceux qui lui donnent naissance ; on trouve également une déviation maximum indiquant l'existence d'un faisceau de rayons efficaces. Les couleurs de ce second arc sont inverses de celles du premier et sa largeur est près du double de la largeur de celui-ci.

Le second arc-en-ciel, comme on le conçoit bien, a une intensité beaucoup plus faible que le premier. On a dit que, dans des circonstances très-favorables, on avait pu distinguer un troisième arc; mais des observateurs

ont nié le fait : il semble qu'après trois réflexions dans les gouttes de pluie la lumière est trop affaiblie pour que l'on puisse avoir une impression sensible.

Dans la position que nous avons choisie pour expliquer l'arc-en-ciel, le soleil étant à l'horizon et les rayons solaires horizontaux, les arcs doivent former une demi-circonférence ; mais comme habituellement le soleil a une certaine hauteur lorsque le phénomène s'observe, on voit des arcs d'une moindre étendue. Il est facile de comprendre, d'après les détails dans lesquels nous venons d'entrer, que si l'on se trouve au haut d'une montagne, et que le soleil approche de l'horizon, alors on peut voir plus d'une demi-circonférence ; enfin si le soleil étant au zénith, on est placé au haut du mât d'un vaisseau, on pourrait voir à ses pieds un cercle complet.

Quelquefois on aperçoit un arc-en-ciel ou des arcs-en-ciel, sans que la pluie tombe sur la terre ; dans ce cas les gouttes de pluie se forment dans les régions supérieures et se dissolvent avant d'atteindre le sol. Quelquefois aussi on voit non-seulement deux arcs-en-ciel, mais quatre ; alors le soleil est réfléchi par une nappe d'eau, et l'image virtuelle donne lieu à des arcs, comme l'image réelle ; suivant la position de cet astre, les cercles se coupent de diverses manières.

Si les arcs-en-ciel proprement dits sont faciles à expliquer d'après les lois de la réfraction simple, et si leur théorie s'accorde très-bien avec les faits, il n'en est pas de même des arcs surnuméraires, supplémentaires ou secondaires, qui se montrent presque toujours simultanément avec les arcs proprement dits. Ces arcs sont en général des alternatives de vert et de violet qui succèdent au violet du premier arc, et sont situés par conséquent en dedans de celui-ci. Quelquefois d'autres couleurs sont visibles et l'on aperçoit du rouge vif ou des alternatives de pourpre et de vert ; M. Brewster a même vu à l'extérieur du deuxième arc-en-ciel, un faisceau rouge et un autre vert. Il est à remarquer que ces arcs sont à leur maximum au point culminant de l'arc-en-ciel, et qu'ils dimi-

nuent en approchant près de l'horizon, là où quelquefois les arcs-en-ciel ont une intensité lumineuse très-considérable.

Quelques physiciens ont attribué ces arcs à un phénomène de diffraction analogue à celui qui produit les couronnes dont il va être question plus loin; Venturi a supposé qu'il existait des gouttes d'eau aplaties donnant lieu aux arcs surnuméraires, les arcs principaux étant produits par les gouttes sphériques; mais ces deux explications ne sont pas adoptées aujourd'hui, et il est probable, comme l'a avancé Young, que ces arcs secondaires sont des phénomènes d'interférence dus aux rayons incidents avant et après l'incidence maximum. Ces rayons émanant d'une même source lumineuse, et les différences des chemins parcourus par la lumière étant représentées par les différences d'épaisseur des diverses parties de la goutte d'eau qu'ils ont traversée, il en résulte qu'ils sont dans toutes les conditions voulues pour interférer. Les différences des chemins parcourus par la lumière dépendent donc du diamètre de la goutte liquide; plus celle-ci sera grosse, moins les franges d'interférence seront sensibles; ainsi cela expliquerait pourquoi, en approchant de la terre, à droite et à gauche des arcs-en-ciel, les arcs surnuméraires sont à peine visibles, les gouttes d'eau dans cette circonstance étant en général plus grosses qu'à une certaine hauteur; les teintes de l'arc-en-ciel, au contraire, augmentant d'intensité avec le diamètre des sphérules liquides, sont habituellement à leur maximum près du sol.

La lune peut, dans quelques circonstances, lorsqu'elle est dans tout son éclat, donner des arcs-en-ciel analogues aux précédents: mais ils sont toujours très-pâles et d'une teinte banchâtre, surtout comparés aux arcs-en-ciel solaires.

§ IV. — *Des halos et des parhélies.*

Les halos sont des phénomènes optiques extrêmement compliqués, qui sont dus à la réfraction de la lumière

à travers des petites particules glacées flottant dans l'atmosphère. Le soleil et la lune peuvent montrer les effets dont il va être question. Les halos sont rares ; la plupart du temps, quand on les observe, on ne les voit pas complétement, et même, pendant l'observation, leurs apparences peuvent changer.

On aperçoit en général, quand ce météore a lieu, des cercles colorés qui sont les halos proprement dits, et qui ont pour centre l'astre qui les produit ; le premier a pour *demi-angle visuel* 22°, et le second 46° ; son diamètre est donc à peu près double du premier. Ces arcs ont le rouge en dedans et le violet en dehors; rarement on les voit ensemble. Il paraîtrait que l'on a observé un troisième halos ou cercle concentrique au soleil, de 90° de demi-angle visuel, le violet étant plus rapproché du soleil que le rouge, c'est-à-dire, ayant les couleurs disposées dans un ordre inverse de celles des deux autres.

Les modifications atmosphériques qui donnent naissance à ces cercles concentriques au soleil, peuvent également engendrer un cercle blanc parallèle à l'horizon, dont la largeur est la même que celle de l'astre éclairant, et dont la circonférence passe par cet astre. Il se produit aussi quelquefois une autre bande blanche verticale qui, jointe au cercle horizontal, donne une croix blanche encadrée dans le halos ; dans quelques circonstances ces bandes se terminent aux halos; d'autres fois elles s'étendent plus loin, le cercle horizontal embrassant alors tout l'horizon. La figure 16, planche I, représente un halos formé autour du soleil O; les deux halos colorés consécutifs de 22° et de 46° sont les cercles OA et OB, et les bandes OH, OV formant une croix, sont les cercles parhéliques horizontaux et verticaux.

Les parhélies ou images du soleil, et les parasélènes ou images de la lune, se forment sur ces bandes blanches. Ces apparences colorées sont placées près des intersections du cercle parhélique et du halos, mais un peu plus éloignées du centre lumineux O, et l'éloigne-

ment augmente à mesure que l'astre est plus élevé sur l'horizon. Les parhélies sont colorés comme les halos, et ont souvent un prolongement en forme de queue sur le cercle parhélique où ils se trouvent. Enfin on peut voir aussi une image de l'astre à l'opposite de celui-ci, au second point de croisement des cercles parhéliques supposés tous deux prolongés; on l'a nommé authélie, mais on réserve plutôt ce nom aux phénomènes dont il sera question plus loin.

Quelquefois les cercles parhéliques ou bandes blanches horizontales et verticales ne s'étendent pas au delà du halos; ainsi le capitaine Back a observé un halos lunaire de 22°, avec une croix blanche au milieu, terminée au halos, puis quatre parasélènes aux extrémités des branches de la croix.

Enfin, indépendamment des halos proprement dits ou cercles concentriques au soleil, des cercles parhéliques et des parhélies, on voit quelquefois des cercles tangents aux halos et des portions d'arcs elliptiques très-compliqués qu'il serait trop long de décrire ici; il faut se reporter à la description des halos qui ont présenté des apparences si diverses.

En résumé, dans les halos, on peut distinguer trois sortes d'apparences :

1° Les cercles concentriques au soleil, ou les halos proprement dits;

2° Les cercles parhéliques blancs, passant par cet astre;

3° Les parhélies et les cercles tangents.

Mariotte a attribué les halos à la réfraction de la lumière à travers des petits cristaux de glace flottant dans l'atmosphère. Les observations faites depuis, et les résultats du calcul sont venus confirmer cette manière de voir.

Les halos de 22° et de 46°, qui sont des cercles concentriques aux astres producteurs, sont dus à la réfraction des rayons à travers des prismes de glace dont les faces, étant inclinées de 60° et de 90°, donnent naissance à des faisceaux de rayons efficaces analogues à ceux que nous avons décrits à propos de l'arc-en-ciel. En effet,

nous avons vu que toutes les formes des cristaux de neige se rapportent à des prismes droits hexagonaux ; or, les faces contiguës faisant entre elles un angle de 120°, et un prisme d'eau d'un angle de 120° ne laissant pas passer la lumière, des angles dièdres de cette grandeur ne peuvent réfracter les rayons lumineux; mais deux faces séparées par une face intermédiaire, donnant lieu à un prisme de 60°, le phénomène dont il s'agit peut alors se produire. Quant aux angles formés par l'intersection des bases et des pans de ces prismes, ils ont tous 90°. Ainsi, en cherchant le maximum de déviation dans des prismes dont les angles dièdres sont de 60° et de 90°, comme on le fait à l'égard des gouttes d'eau pour expliquer l'arc-en-ciel, on trouve 22° et 46°, pour les déviations des rayons rouges correspondant aux deux halos concentriques au soleil; de plus, la réfraction ayant lieu sans réflexion intérieure, le rouge est en dedans et le violet en dehors. Il est probable que le troisième cercle, dont les couleurs sont dans un ordre inverse, est dû à la réfraction des rayons qui ont subi une première réflexion au fond de ces prismes.

Les cercles parhéliques horizontaux et verticaux étant blancs et sans couleurs, indiquent qu'ils doivent leur production à la lumière réfléchie; c'est en effet dans la réflexion de la lumière sur les petits flocons de neige qu'il faut chercher leur explication. Lorsque les prismes sont très-aplatis, la neige se présente en paillettes qui tombent de façon à présenter leurs faces hexagonales horizontales; chacune de ces faces horizontales donne lieu à une image solaire verticale, et la réunion de ces images virtuelles solaires produit une traînée lumineuse blanche verticale. Si les prismes au contraire sont allongés, étant suspendus dans l'air, d'après leurs dimensions, ils se disposent de préférence ou verticalement ou horizontalement; alors, dans l'un comme dans l'autre cas, il y a un très-grand nombre de facettes verticales, produisant une série d'images virtuelles solaires horizontales, c'est-à-dire le cercle parhélique blanc horizontal. Cela revient

à supposer que, par suite d'une chute lente des particules glacées, il y a un plus grand nombre de facettes verticales et horizontales de glace, que de facettes dans d'autres positions; les facettes disposées dans tous les sens jettent une teinte de blanc sur la couleur de l'atmosphère autour de l'astre producteur.

Les parhélies latéraux sont dus à la réfraction minimum ou aux rayons efficaces de ces prismes verticaux qui sont en plus grande quantité que les autres : d'après cela, à l'horizon même, les parhélies doivent se trouver sur les cercles des halos à l'intersection du cercle parhélique blanc horizontal; en outre, les prismes verticaux agissant d'autant plus obliquement que l'astre est plus élevé, les parhélies doivent s'éloigner de ce halos à mesure que l'astre s'élève sur l'horizon; c'est en effet ce qu'on observe. Ainsi, suivant cette théorie, lorsque des prismes de glace flottent dans l'atmosphère dans toutes les directions, les halos concentriques au soleil ou à la lune se montrent seuls; mais si les prismes verticaux ou horizontaux viennent à prédominer, soit par la chute de la neige, soit par un autre motif, les parhélies et les cercles blancs prennent naissance.

On explique par la prédominance des prismes allongés horizontaux, les cercles tangents au halos de 22°. En effet, la direction de ces prismes a une influence très-grande sur la position des parhélies; si l'on considère une série de ces prismes horizontaux alignés dans la direction perpendiculaire à celle qui joint le soleil à l'observateur, alors les deux parhélies sont situés à 22° en haut et en bas de cet astre sur le halos de ce diamètre; en supposant les prismes toujours horizontaux, mais alignés de façon à faire un angle de 1° avec la direction primitive, les parhélies de ces prismes seront un peu en dehors de la position des précédents; en considérant ainsi successivement les prismes horizontaux alignés dans tous les azimuts, on trouve qu'ils donnent naissance à des parhélies dont la réunion donne des courbes tangentes au halos de 22°. La plupart des cercles tangents ont été

expliqués d'une manière analogue par des considérations de réfraction dans des prismes de glace plus ou moins inclinés.

Nous nous bornons aux observations précédentes pour donner une idée de la complication du phénomène; on voit donc que les halos sont dus à la réfraction, et en général on les observe lorsque des cirrus ou des cirro-stratus s'interposent entre les astres et l'observateur; cela vient à l'appui de ce que nous avons déjà dit touchant la constitution de ces nuages.

Il est facile de se rendre compte du motif pour lequel les halos sont rarement complets, car les diverses apparences observées tiennent chacune à une des formes que les flocons de glace peuvent affecter lors de leur suspension dans l'atmosphère : si la neige est lamellaire, les cercles blancs passant par les astres ou les bandes blanches prennent seuls naissance; si elle est prismatique, on aperçoit les halos concentriques aux astres producteurs; et enfin lorsque les diverses espèces de formes subsistent à la fois, le halos complet peut se manifester.

SECTION IV.

DIFFRACTION ET POLARISATION.

---

§ I. — *Des couronnes.*

Très-souvent, lorsque l'air n'est pas pur, et qu'il se trouve des gouttelettes de vapeur vésiculaire entre le soleil ou la lune et un observateur, ou bien lorsque des nuages légers viennent à passer devant ces astres, alors il apparaît un, deux, trois ou plusieurs anneaux concentriques à l'astre. Ces anneaux, que l'on observe fréquemment autour de la lune, et que dans le vulgaire on désigne improprement sous le nom d'arcs-en-ciel lunaires et de halos, ne sont que des couronnes, et ne doivent pas leur origine à la réfraction, mais bien à la diffraction; ils ont le rouge en dehors et le violet en dedans

comme le premier arc-en-ciel, et leurs couleurs sont inverses de celles des deux halos concentriques aux astres. Les diamètres des couronnes de même couleur suivent la série des nombres 1, 2, 3, 4....; seulement, comme nous les observons à l'aide de la lumière blanche, le diamètre du premier anneau semble agrandi. Ce diamètre, qui varie de 1° à 4°, dépend du diamètre des vésicules d'eau interposées entre l'astre éclairant et l'observateur. En général, il est bleu mêlé de blanc depuis l'astre jusqu'à une certaine distance; puis vient un cercle rouge et ensuite d'autres cercles colorés, de même que dans les anneaux colorés de Newton. Il est nécessaire, pour que le phénomène ait lieu, qu'il y ait un certain nombre de globules de même diamètre, et même un beaucoup plus grand nombre de ce diamètre que de tout autre. Si les diamètres des sphérules des nuages étaient tous différents, on ne verrait pas de couronnes.

On observe un phénomène absolument semblable lorsqu'on examine un objet lumineux à travers une lame de verre sur laquelle on a répandu du lycopode, ou bien à un degré moins marqué lorsque, avec l'haleine, la lame est légèrement recouverte d'humidité.

Les couronnes sont fréquentes quand des lambeaux de cumulus passent entre la lune et l'observateur. Pour les voir autour du soleil, il faut avoir soin de se servir de verre noirci; on les aperçoit alors avec un grand éclat. Les cirrus et les cirro-stratus ne donnent lieu qu'à des halos.

Nous renvoyons à l'appendice pour la théorie des couronnes, et pour faire concevoir comment on peut en conclure le diamètre des sphérules des nuages.

§ II. — *Anthélies.*

On désigne, sous le nom d'anthélies, des phénomènes analogues aux couronnes, mais que l'on aperçoit à l'opposé du soleil à la manière des arcs-en-ciel; ils se manifestent quand le soleil, s'élevant sur l'horizon, l'observateur se trouve entre cet astre et un nuage ou un

brouillard : alors autour de l'ombre de sa tête, l'observateur voit, projetée sur le nuage, une auréole dont la lumière est vive et qui va en diminuant d'intensité jusqu'à une certaine distance. Dans les régions polaires, le phénomène se présente toutes les fois qu'il y a simultanément du soleil et du brouillard; sur les montagnes, il se produit lorsque l'ombre de l'observateur est projetée sur un nuage. Le nombre des cercles que l'on aperçoit varie de 1 à 4; ils ont leur centre sur le prolongement de la ligne qui, partant du soleil, passerait par l'œil de l'observateur. Les déterminations de Scoresby ont donné pour les demi-diamètres de ces cercles :

1er cercle, 1° 45′;
2e cercle, 4° 45′;
3e cercle, 6° 30′;

enfin le 4e cercle, qui s'observe rarement, a, d'après plusieurs déterminations, un demi-diamètre moyen de plus de 37°.

Ce dernier cercle porte le nom de *cercle d'Ulloa*, ou *arc-en-ciel blanc ;* les opinions ne sont pas bien fixées à son égard. Quelques physiciens pensent que c'est un arc-en-ciel ordinaire accompagnant des couronnes vues par réflexion sur les nuages; mais la valeur moyenne, qui paraît être de 37°, est moindre que 41°, valeur angulaire moyenne du demi-diamètre de l'arc-en-ciel ordinaire; il faudrait donc d'après cela chercher la cause de sa production dans les effets de diffraction.

M. Babinet a également expliqué, par la diffraction, pourquoi, lorsque le soleil se lève derrière une colline couverte d'arbres et de broussailles, le spectateur, dans l'ombre de la colline et près des rayons solaires qui vont bientôt l'atteindre, voit toutes les petites branches projetées sur le ciel, non pas opaques et noires, mais au contraire blanches et argentées. Ces petites branches jouent le même rôle que les globules de vapeur dans le phénomène des couronnes. (*Voyez l'appendice.*)

M. Babinet rapporte à la même cause les couleurs des

fils d'araignées, des fils minces de métal, des poussières qui voltigent dans une chambre éclairée par un faisceau de rayons solaires, etc.

§ III. — *Scintillation.*

La scintillation des étoiles a excité de tout temps la sagacité des physiciens et des astronomes; elle consiste en ce que l'intensité lumineuse de ces astres, de même que leur couleur, changent à de très-courts intervalles. Ce phénomène ne se produit pas également dans toutes les parties de l'atmosphère : au zénith la scintillation est moins vive que vers l'horizon; elle dépend de l'état de l'atmosphère, et se manifeste d'autant mieux que celle-ci est plus agitée. Si les grosses planètes ne scintillent pas, on doit attribuer ce résultat à leur diamètre apparent soustendant un angle sensible au fond de l'œil.

Tous les physiciens qui ont observé la scintillation depuis Hooke, ont admis qu'elle était due au mélange des couches d'air inégalement denses et diversement échauffées, mais sans l'expliquer d'une manière satisfaisante. M. Arago l'a rattachée à la théorie des interférences des rayons lumineux, et en a donné l'explication suivante :

Admettons que la rétine soit en O et le cristallin en AB (pl. I, fig. 20); tous les rayons émanés de l'étoile S tombant sur le cristallin AB, viennent se réfracter en O de manière à produire la sensation de l'image de cette étoile. Les rayons L*a*O, L*b*O sont tous des rayons parallèles; s'ils traversaient des masses d'air d'égale densité et d'égale épaisseur, le phénomène de la vision serait simple; mais comme entre AB et L se trouvent des couches d'air agitées, alors tous les rayons parallèles ou peu inclinés qui arrivent à la rétine, n'ont pas traversé la même épaisseur gazeuse et sont dans le même cas que s'ils avaient une certaine différence de route; d'après la théorie des ondulations, ils doivent interférer, ou du moins une partie d'entre eux doit interférer. Ainsi, certains rayons de couleur simple, bleus, verts ou

jaunes, pourront être détruits par suite de ces interférences; alors la couleur de l'étoile, à cet instant, devra paraître jaune, rouge, ou bleue, c'est-à-dire de la couleur complémentaire des rayons qui seront éteints. Il résulte de là que l'agitation de l'air mêlant à chaque instant les couches traversées par les rayons lumineux, la nature des rayons détruits variera de la même manière et la couleur de l'étoile changera à chaque instant. Telle est la cause du phénomène de la scintillation.

Il y a une remarque importante à faire à ce sujet : lorsque les étoiles scintillent, on peut en distinguer quelques-unes qui ne seraient pas visibles sans cela. En effet, les interférences produisent une concordance ou une discordance d'ondulations lumineuses donnant lieu à une intensité alternativement plus forte et plus faible que l'intensité moyenne de l'étoile, en même temps qu'à un changement de couleur.

§ IV. — *Polarisation de l'atmosphère.*

On sait que lorsque la lumière naturelle se réfléchit à la surface d'un corps, elle est partiellement polarisée, et que la quantité de lumière ainsi polarisée dépend de l'angle d'incidence et de la nature de la substance. La lumière étant réfléchie par les particules d'air, et cette réflexion donnant lieu à l'illumination de l'atmosphère, il en résulte que la lumière émanée d'un point du ciel doit être en partie polarisée.

La polarisation de l'atmosphère a été observée pour la première fois par M. Arago, en 1809, et c'est même cette étude qui l'a conduit à la découverte de la polarisation chromatique. Son appareil se composait d'une plaque de cristal de roche et ensuite d'un analyseur en spath d'Islande; le quartz se colorait par la lumière polarisée, et la coloration indiquait le plus ou moins de polarisation de la partie de l'atmosphère sur laquelle il dirigeait l'instrument.

De tous les polariscopes que l'on peut employer pour étudier la polarisation atmosphérique, le plus simple et

le plus commode est, sans contredit, celui de Savart. Il est formé de deux quartz obliques, croisés à angles droits, et d'une lame de tourmaline dont l'axe divise en deux parties égales l'angle des sections principales des deux quartz. Lorsqu'on examine à l'aide de cet appareil la lumière polarisée, on aperçoit des franges colorées, dont la vivacité plus ou moins grande indique la polarisation plus ou moins intense de la lumière et la direction du plan de polarisation ; des traces de polarisation sont ainsi rendues sensibles à l'aide de ce précieux instrument. Non-seulement on a employé des polariscopes, mais encore on a fait usage de polarimètres pour mesurer la quantité de lumière polarisée envoyée par les différentes parties de l'atmosphère ; mais cette étude n'ayant pas encore été poussée bien loin, nous n'entrerons ici que dans les détails des résultats obtenus avec les polariscopes, indiquant comment la polarisation s'effectue dans les différentes parties du ciel, suivant la position du soleil.

Si l'on suppose que le soleil soit peu élevé sur l'horizon vers l'occident, et que l'on analyse l'état de la lumière émise par l'atmosphère dans le plan vertical du soleil, on trouve que cette lumière est d'abord faiblement polarisée dans le voisinage de cet astre ; elle l'est davantage à mesure que l'on s'élève vers le zénith, et la polarisation est verticale, c'est-à-dire que le plan de polarisation passe par le soleil, le point exploré et l'œil de l'observateur : la réflexion sur les particules d'air est donc ici bien manifeste ; à partir de 90° de la position du soleil, la polarisation diminue, et l'on arrive vers un point neutre situé du côté de l'orient, que la symétrie indiquerait devoir se trouver au point anti-solaire, mais qui est réellement plus élevé sur l'horizon. Si l'on continue à explorer la polarisation de l'atmosphère en dépassant le point neutre et s'avançant vers l'horizon oriental, on trouve alors que la polarisation a changé de signe et qu'elle est horizontale. Au soleil levant et au soleil couchant le point neutre, au lieu de se trouver à 180° du

soleil ou sur l'horizon même, est élevé de 20 ou 30°. Ce point a été observé par M. Arago.

On attribue le point neutre et la polarisation horizontale près de l'horizon aux réflexions secondaires qui se manifestent entre les molécules d'air; par conséquent, la polarisation de la lumière émanée d'un point du ciel peut être considérée comme produite par la réflexion sur ces molécules des rayons directs du soleil et de ceux qui proviennent de toute l'atmosphère : or, la seconde cause, qui est fort complexe, donnant pour résultante une polarisation horizontale, il s'ensuit que les divers effets que nous venons de décrire peuvent se déduire du mélange de rayons lumineux polarisés verticalement et horizontalement. A une certaine distance du soleil, la polarisation horizontale est totalement éclipsée par la polarisation verticale due aux rayons émanés directement de cet astre; plus bas, au contraire, la polarisation horizontale est prédominante.

Voilà bien les phénomènes qui se passent dans le plan vertical du soleil. A droite et à gauche on observe des effets analogues et faciles à prévoir; seulement le plan de polarisation est plus ou moins oblique. Nous nous en tiendrons, du reste, pour ne pas compliquer l'exposé des faits, aux phénomènes qui se passent dans ce premier plan.

Il est nécessaire, pour que les effets que nous venons de décrire s'observent avec régularité, que l'air soi calme et serein; car toutes les parties de l'atmosphèret ayant une influence sur le phénomène, la présence d'un nuage même à une très-grande distance, celle de la neige, l'état du sol, le voisinage de la mer, peuvent influer considérablement sur le point neutre et le déplacer; ce point sort même du vertical du soleil quand des nuages occupent un côté de l'atmosphère.

Il existe d'autres points dans le vertical du soleil où la polarisation est nulle; M. Babinet a trouvé un de ces points, qui constitue un second point neutre au-dessus du soleil, à peu près à la même hauteur où se trouve

le premier du côté de l'orient, lorsque le soleil est près de l'horizon. Ainsi, lorsqu'on suit l'état de la polarisation atmosphérique par une belle journée, et que le soleil a dépassé l'horizon, puis s'est couché, alors on voit le point neutre anti-solaire (point Arago) monter considérablement dans l'atmosphère orientale, tandis que, d'après M. Babinet, l'autre point qui se trouve au-dessus du soleil du côté occidental, s'abaisse sensiblement, mais moins que le premier ne s'élève.

M. Brewster a observé un troisième point neutre situé au-dessous du soleil, dans le vertical de cet astre, et à peu près à la même distance du soleil que le point neutre situé au-dessus. Ce point est très-difficile à observer, et est dû à la même cause que les autres. Ainsi, en partant du soleil et examinant la région située au-dessous, entre cet astre et l'horizon immédiatement sous le soleil, la polarisation horizontale, très-difficile à apprécier, doit exister seule, la polarisation verticale par la position oblique des rayons n'étant pas sensible; à une petite distance, celle-ci devient manifeste, et enfin acquiert la même valeur que la première polarisation : de là le point neutre; un peu plus bas la polarisation verticale l'emporte. Si donc, pour rendre le phénomène sensible, comme le remarque M. Babinet, on examine la portion de l'atmosphère située sous le soleil avec le polariscope de Savart en mettant les franges verticales, alors on verra du même coup : 1° l'espace voisin du soleil sans polarisation; 2° des bandes faibles mais sensibles, provenant de la polarisation horizontale; 3° une interruption indiquant le point neutre de M. Brewster; puis 4° des bandes qui atteignent l'horizon et attestent la polorisation verticale.

Ainsi, en résumé, ces trois points neutres, situés dans le vertical du soleil, sont dus à l'influence de deux causes : 1° à la polarisation verticale due aux rayons solaires qui frappent les particules d'air dans ce plan et reviennent à l'œil; 2° à la polarisation horizontale qui est, en chaque point, la résultante de l'illumination produite par le reflet de toute l'atmosphère. Si l'on se repré-

sente l'horizon en HH' (pl. I, fig. 19), l'observateur en O, le soleil en S, alors dans le vertical HSH', le point neutre Arago sera quelque part en A, le point neutre Babinet en B, et le point neutre Brewster en C. A partir de S, il y a une polarisation horizontale qui est insensible en S à cause du soleil, et qui se manifeste à peu de distance des points neutres; au-delà, la polarisation verticale a lieu de C jusqu'au-dessous de l'horizon, et de B en A; mais celle-ci augmente d'abord, puis diminue de manière à être nulle en A. De A à H' il existe la polarisation horizontale.

Nous avons supposé le soleil se couchant à l'occident; mais on conçoit que lorsqu'il s'élève à l'orient les effets doivent être semblables mais inverses.

Pour spécifier mieux la position de ces points, nous citerons textuellement un extrait d'une lettre de M. Brewster, renfermant un résumé de quatre années d'observations (*Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, tome XX, page 801 et suivantes).

« Distance du point neutre de M. Arago au point anti-solaire ou opposé au soleil, au moment où ce point neutre est à l'horizon...... 11° 1/2

« Distance du même point neutre au point anti-solaire au coucher du soleil........... 18° 1/2

« Distance de ces deux points à la fin du crépuscule .... 25°

« Distance du point neutre de M. Babinet au-dessus du soleil, quand la hauteur de l'astre est considérable........................ 6 ou 7°

« Cette distance s'accroît jusqu'à 18° 1/2 au coucher du soleil.

« Distance du point neutre de M. Brewster au-dessous du soleil, quand le soleil est à une grande hauteur........................ 7 ou 8°

« Cette distance s'accroît jusqu'à 16 ou 18° quand ce point neutre atteint l'horizon. Cette dernière observation, avec un soleil peu élevé, est fort difficile à faire. »

M. Brewster a fait en outre les observations sui-

vantes : il a vu un point neutre secondaire qui accompagne le point neutre de M. Arago dans des états particuliers de l'horizon. Ce point secondaire se lève après le premier point neutre ordinaire, et entre ces deux points la polarisation est négative. M. Brewster admet qu'il doit y avoir un point neutre secondaire lié à chacun des autres points, et qui, à cause de leur proximité du soleil, ne permet pas de les observer.

Nous avons supposé, dans tout ce qui précède, que les phénomènes de polarisation étaient constants et bien définis, ce qui exige un ciel pur, même au-delà de l'horizon; le plus souvent, ils sont très-variables.



CHAPITRE VI.

DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

SECTION Ire.

DE L'ÉTAT ÉLECTRIQUE DE LA TERRE ET DE L'ATMOSPHÈRE.

§ I. — *Des appareils.*

La terre et l'atmosphère sont de vastes réservoirs d'électricité où la nature va puiser les causes productrices des orages et d'autres phénomènes atmosphériques que nous allons exposer; mais, avant d'entrer en matière, nous rappellerons les principes généraux qui président au dégagement de l'électricité, principes que nous aurons l'occasion d'invoquer pour interpréter tous ces phénomènes.

En général, toutes les fois que les particules des corps éprouvent un dérangement quelconque, soit dans leur position naturelle d'équilibre, soit dans leur groupement, soit dans leur constitution chimique, il y a séparation immédiate d'une portion des deux électricités, dont la réunion constitue l'électricité naturelle que l'on suppose exister dans tous les corps lors de l'équilibre moléculaire. Ce phénomène se produit donc toutes les fois que les particules sont ébranlées ou séparées par le frottement, la percussion, la chaleur, la lumière, l'action chimique, etc. Dans le frottement, le corps frotté et le corps frottant prennent chacun un excès d'électricité contraire dont la nature dépend plutôt de l'état des surfaces que de la substance des corps; dans les actions chimiques, le corps

qui se comporte comme acide rend toujours libre de l'électricité positive, et celui qui agit comme alcali de l'électricité négative.

Cette séparation distincte des deux électricités à la suite d'une action physique ou chimique se retrouve à l'égard de la terre et de l'atmosphère, qui sont toujours dans deux états électriques différents par suite de causes non encore connues et sur lesquelles néanmoins nous aurons l'occasion de dire quelques mots.

Avant d'aborder toutes les questions relatives à l'électricité atmosphérique, il est indispensable de faire connaître les différents appareils à l'aide desquels on parvient à étudier ses effets.

On se sert d'électroscopes, d'électromètres et de multiplicateurs particuliers. Parmi les électromètres dont l'usage est le plus fréquent, en raison de la facilité de transport dans les voyages, se trouve celui de Saussure, composé de deux fils fins de métal terminés chacun par une petite balle de sureau et adaptés à une tige métallique fixée à la partie supérieure d'une cloche de verre carrée, de 5 à 6 centimètres de côté; de cette manière, les deux petits pendules se trouvent placés dans l'intérieur de la cloche. La tige est elle-même surmontée d'un conducteur terminé en pointes, composé de trois parties pouvant s'ajuster les unes dans les autres, et chacune d'une longueur de 2 décimètres; ce conducteur est destiné à recueillir de l'électricité au-dessus de la tête de l'observateur. Pour préserver l'électromètre de la pluie ou de la neige, on visse à la partie supérieure de la tige un petit chapeau en laiton laminé, fort mince, de forme conique et d'un décimètre de diamètre. Le conducteur s'ajuste également à vis sur ce chapiteau. Une échelle divisée est appliquée sur l'une des faces de la cage de verre, afin d'apprécier les angles d'écart des deux petits pendules. Saussure, pour graduer cet appareil, c'est-à-dire pour trouver le rapport entre l'intensité de l'électricité et l'écartement correspondant des balles de sureau, a opéré comme il suit : ayant pris

deux électromètres désarmés, aussi égaux entre eux que possible, il électrisa l'un d'eux de manière à ce que les deux boules de sureau s'écartassent par exemple de 6 millimètres; avec le crochet de l'autre électromètre, qui n'était point électrisé, il toucha le crochet du premier : à l'instant même, l'électricité se partagea entre les deux, et la divergence fut dans l'un comme dans l'autre de 4 millimètres. Il résulte de là qu'une diminution de moitié dans l'intensité de l'électricité n'avait réduit la divergence que d'un tiers. Ayant enlevé l'électricité à l'un des électromètres, il le mit en contact avec l'autre, l'écartement fut de $2^{mm},8$, lequel correspondait à une intensité égale au quart de l'intensité primitive. Il parvint ainsi à former une table, qui change, à la vérité, d'un appareil à l'autre, mais que tout observateur doit avoir l'attention d'établir avant de commencer une série régulière d'observations.

Volta a substitué aux fils métalliques, deux petites pailles longues d'environ 5 centimètres et de 6 millimètres de large, suspendues à deux petits anneaux très-mobiles adaptés à la tige de l'électromètre, et qui, dans l'état de repos, sont contiguës. Ces petites pailles, quand elles sont sèches, sont beaucoup plus légères que les fils métalliques armés de petites balles de sureau, et offrent, à égalité de poids, beaucoup plus de surface: avantage précieux dans les expériences de ce genre; en prenant des pailles plus grosses, on peut mesurer des intensités électriques doubles et même quadruples. Volta a constaté que lorsque l'appareil est sensible ou médiocrement sensible, sa marche est régulière jusqu'à 26° d'écartement, c'est-à-dire que, jusque-là, les angles d'écarts sont proportionnels aux intensités électriques qui les produisent. Il a remarqué en outre que, si les pailles sont également longues, une différence sensible dans leur grosseur occasionne à peine quelque différence dans les déviations; que dès l'instant qu'elles ont moins de 27 millimètres de long, l'électromètre n'a plus la marche régulière des autres; enfin, qu'il est nécessaire

que la petite cloche entourant les pailles ne soit pas trop grande, dans la crainte que l'air intérieur ne conserve trop longtemps l'électricité qu'il enlève à chaque instant.

Volta a conseillé en outre de placer à l'extrémité de la pointe de la tige métallique dont est armé l'électromètre, un corps enflammé destiné à établir un courant d'air apportant l'électricité des couches d'air environnantes; il a obtenu par ce moyen des résultats qui étaient souvent doubles de ceux qu'accusait l'appareil sans la présence d'un corps en ignition. Ce qu'il a trouvé de mieux est une espèce d'allumette formée d'une mèche de coton soufrée et placée dans l'intérieur d'une spirale en fil de fer ajustée à la pointe du conducteur. Il faut s'assurer préalablement que ce corps ne fournit pas d'électricité à la tige pendant sa combustion. L'appareil que nous venons de décrire se place dans une boîte de bois, et peut être transporté dans les voyages sans risque d'être brisé.

Si l'on veut mesurer avec une grande exactitude l'écartement des pailles, on dispose à peu de distance une lunette et un arc divisé.

Quand il s'agit d'observer des quantités d'électricité excessivement faibles, on emploie l'électroscope à feuilles d'or, avec deux armatures faisant fonctions de condensateurs.

L'électromètre sert à recueillir l'électricité libre qui se trouve dans l'atmosphère; mais si l'on veut accuser la présence de cette électricité quand elle s'écoule dans un fil conducteur, il faut faire usage d'un multiplicateur convenablement disposé, dont le fil est isolé avec plus de soin qu'on ne le fait ordinairement. Après avoir été recouvert de soie, comme à l'ordinaire, on le plonge dans une solution concentrée de gomme laque dans l'alcool, puis on l'enroule lentement autour du cadre du multiplicateur; le fil se recouvre ainsi d'une couche de vernis à la gomme laque, isolant mieux les circonvolutions les unes des autres que la soie. Pour opérer avec

cet appareil, on met en communication la tige métallique qui enlève de l'électricité à l'air, avec un des bouts du fil, tandis que l'autre bout communique avec le sol. Le courant électrique produit par le passage de l'électricité libre de l'atmosphère dans le fil, fait dévier l'aiguille aimantée d'un certain nombre de degrés. Si l'on a eu soin, avant l'expérience, de graduer son appareil afin d'avoir le rapport entre les déviations de l'aiguille aimantée et l'intensité du courant, on compare alors facilement les résultats. Il faut avoir l'attention de subordonner la sensibilité de l'appareil à l'intensité du courant que l'on veut observer. Par exemple, quand l'atmosphère est fortement chargée de l'électricité, il faut bien se garder d'employer un multiplicateur trop sensible, attendu d'une part, que l'aiguille serait chassée à 90°, et que de l'autre elle perdrait de son aimantation.

Dans l'étude des phénomènes électriques de l'atmosphère, l'électroscope ou l'électromètre ne donne des indications que lorsqu'il est mis en contact avec un corps plus électrisé que le milieu dans lequel il se trouve; il n'accuse donc que la différence entre son état électrique et celui du milieu ambiant; ainsi, quand il ne manifeste aucun effet, il ne faut pas se hâter d'en conclure qu'il n'existe pas d'électricité dans le milieu où l'on opère.

L'électroscope, suivant les circonstances, est surmonté d'une tige métallique terminée en boule, en pointe, ou par l'adjonction d'un faisceau de fils. La boule est destinée à observer les actions par influence; si la tige est terminée en pointe, ou par un faisceau de fils présentant un grand nombre de pointes, l'instrument prend une charge semblable à celle de la région électrisée, attendu que l'électricité de signe contraire, qui est attirée par cette région, s'échappe par les pointes.

Le multiplicateur ne donne également que des différences; cet appareil est moins sensible que le précédent, attendu qu'il faut une grande quantité d'électricité pour faire dévier l'aiguille aimantée de quelques degrés; il exige, en outre, un écoulement continu d'é-

lectricité, et non une suite de petites décharges, car il est nécessaire que la durée du passage soit suffisante pour que le courant ait le temps de vaincre l'inertie de l'aiguille.

§ II. — *De l'électricité atmosphérique à diverses hauteurs.*

En général, l'électricité de l'atmosphère est positive et celle de la terre négative, ou du moins se comporte comme telle.

L'état positif de l'atmosphère est facile à constater à l'aide des électroscopes, comme on va le voir plus loin; quant à l'état négatif du sol, il suffit de placer l'un des bouts du fil conducteur en platine d'un multiplicateur dans un lieu humide et profond, l'autre dans une partie sèche du terrain ou d'un bâtiment y attenant. Peltier s'est assuré ainsi que le sol est constamment négatif, mais à des degrés différents, suivant l'état hygrométrique et la température de l'air. Quand l'un des bouts du fil du multiplicateur est libre dans l'air, l'appareil n'accuse pas toujours de courant, probablement en raison de la mauvaise conductibilité de l'air; la déviation n'a lieu que lorsque la tension est très-forte ou que l'air est suffisamment humide.

La quantité d'électricité positive qui existe dans l'air et qui varie suivant les localités, est en général plus forte dans les lieux les plus élevés et les plus isolés; elle est nulle dans les maisons, sous les arbres, dans les rues, dans les cours; elle est néanmoins sensible dans les villes au milieu des grandes places, et principalement sur les quais où elle est plus forte qu'en rase campagne, suivant de Saussure.

Pour se rendre compte de ces divers effets, il faut faire attention que l'atmosphère et la terre étant constamment dans deux états électriques contraires, les deux électricités doivent se combiner continuellement dans les couches d'air inférieures jusqu'à une certaine hauteur, par l'intermédiaire des corps situés à la surface du sol; en

rase campagne, l'expérience prouve que l'on ne commence à trouver de l'électricité positive qu'à 1^m ou $1^m,30$ au-dessus du sol ; la recomposition s'effectue donc jusqu'à cette hauteur, quand aucune cause étrangère ne vient la troubler. Au-delà, l'intensité électrique augmente suivant une loi qui n'est pas connue, laquelle dépend du plus ou moins de vapeurs qui se trouvent dans l'air.

On emploie plusieurs moyens pour apprécier la distribution de l'électricité dans l'atmosphère : ce sont les cerfs-volants, les ballons captifs et les flèches lancées avec un arc.

Les cerfs-volants sont munis de pointes métalliques; la corde est tissée avec de la soie ou du chanvre et un fil métallique, et le bout libre est mis en communication avec un électromètre isolé. Les ballons sont retenus captifs avec des cordes tissées et disposées de la même manière. Quant aux flèches, voici comment un de nous (M. Becquerel) les a employées dans des expériences faites au grand Saint-Bernard, sur un des plateaux qui avoisinent l'hospice. On a tendu sur le sol un morceau de taffetas gommé, sur lequel on a déroulé un fil de soie recouvert de clinquant de 80 mètres de longueur. L'un des bouts de ce fil a été mis en communication avec la tige d'un électromètre à pailles, au moyen d'un nœud coulant serrant légèrement la tige; l'autre bout a été attaché au fer de lance d'une flèche, puis l'on a lancé celle-ci avec un arc fortement tendu. La flèche, en s'élevant, a emporté le fil qui, étant faiblement attaché à la tige, s'en est séparé aussitôt qu'il a été déroulé. Les pailles se sont écartées peu à peu à mesure que la flèche s'élevait, et l'écartement a été bientôt tel, que les pailles sont venues frapper fortement les parois de la cloche. Le fil étant séparé de la tige, l'appareil a conservé l'électricité qu'elle avait reçue, et qui était positive. Cette expérience, répétée sur plusieurs points, a donné les mêmes résultats. Il a été prouvé par là, 1° que l'excès d'électricité positive qui se trouve constamment dans

l'atmosphère pendant les temps sereins, augmente en intensité sur les hautes montagnes, depuis le sol jusqu'à une hauteur de 80 mètres; 2° que le fil de soie entrelacé de clinquant a constamment donné la même espèce d'électricité. Les expériences précédentes ont été faites à 2400 mètres environ au-dessus du niveau de la mer.

MM. Gay-Lussac et Biot, dans leur voyage aérostatique, ont cherché à se rendre compte de la distribution de l'électricité dans les régions élevées de l'atmosphère, loin de toutes causes de déperdition, et par conséquent dans des circonstances en apparence plus favorables que celles dans lesquelles on avait expérimenté avant eux. Ils se sont servis, à cet effet, d'un fil de métal de 50 mètres de long, terminé par une boule de métal et attaché par l'un de ses bouts à la nacelle; ils furent fort étonnés de voir que, bien que le temps fût très-serein, l'électricité était constamment négative, résultat inverse de celui que, suivant toutes les apparences, ils espéraient trouver, et qui, en réalité, n'est qu'une anomalie dont il est facile de se rendre compte, comme M. Biot l'a démontré. Concevons un plan horizontal à chacune des extrémités du fil FF' (pl. II, fig. 6), l'atmosphère se trouvera ainsi partagée en trois portions; admettons maintenant, comme l'expérience, du reste, le prouve, que l'intensité de l'électricité croisse en s'éloignant de la surface de la terre, voici ce qui se passe : la portion supérieure de l'atmosphère A qui est électrisée positivement, attire l'électricité négative du fil FF' avec une force représentée par $+$ N et repousse la positive avec une énergie $+$ P, $+$ P représentant l'intensité de sa charge électrique; la couche inférieure B agira de la même manière sur le fil, mais en sens inverse, et l'énergie de son action sera moindre, puisque l'intensité croît avec la hauteur; représentons par p, n, les forces mises en jeu dans ce dernier cas; p étant la charge positive de B, l'électricité négative du fil sera attirée vers la partie supérieure F du fil par un excès de force égal à $N - n$; par la même raison, l'électricité positive sera

repoussée vers l'extrémité inférieure F' avec un excès de force égal à P — p; la partie supérieure de la tige doit donc donner de l'électricité négative. On peut encore arriver à cette conclusion de la manière suivante : + P décompose l'électricité naturelle de la tige FF'; elle attire — N et repousse + P dans la partie inférieure; de même p attire — n et repousse + p dans la partie supérieure, de façon que l'état électrique de l'extrémité supérieure F est représenté par — N + p, ou —(N — p) et celui de l'extrémité inférieure F' par +(P—n); P étant plus grand que p, il s'ensuit que le bout supérieur doit être électrisé négativement.

Pour que cet effet se produisît, il fallait que l'air fût parfaitement sec, afin qu'il n'y eût seulement que des effets d'influence; car si l'air était humide, il y avait écoulement d'électricité positive le long de la tige.

On explique de la même manière un fait observé par Ermann. Ce physicien avait placé à une certaine hauteur dans l'atmosphère un électroscope à feuilles d'or, sans avoir pu recueillir d'électricité; il porta dans une couche d'air supérieure un fil de métal placé horizontalement à l'extrémité d'une tige isolante et l'abaissa ensuite rapidement jusqu'à ce qu'il touchât l'électroscope; l'appareil accusa aussitôt l'électricité positive, dans la région où se trouvait le conducteur. L'effet était inverse quand ce dernier se trouvait dans une couche inférieure et qu'on le relevait avec rapidité.

Ces phénomènes, observés il y a plus de quarante ans, sont analogues à ceux qui ont été obtenus par Peltier en élevant ou abaissant un électroscope au-dessus ou au-dessous de la tête. Si l'on met l'électroscope en équilibre d'électricité avec une région quelconque, en établissant la communication entre la tige, les armatures et la platine, les feuilles d'or marqueront zéro, et il en sera de même en promenant horizontalement l'appareil, quelle que soit l'agitation de l'air. Mais cet état de choses est changé si l'on se trouve à proximité d'un corps voisin faisant saillie au-dessus du sol, et qui possède une tension

d'autant plus forte qu'il se trouve plus élevé et terminé en pointe. En restant dans la couche d'air, le temps étant sec, froid, et le ciel serein, il suffit d'élever l'électroscope de trois décimètres pour avoir une divergence de 20° avec les feuilles d'or par suite d'un excès d'électricité positive; si, dans la journée, l'évaporation a été considérable, il faut élever davantage l'instrument pour avoir la même divergence; en abaissant l'instrument, pour le replacer dans sa position première, les feuilles retombent à zéro; en le descendant au-dessous de cette position, d'une hauteur égale à celle dont on l'avait élevé primitivement, on obtient des signes d'une électricité négative; en le remontant, il marque de nouveau zéro. On doit employer pour ces recherches un électroscope ordinaire à feuilles d'or, armé d'une tige de 40 centimètres au plus, et terminé par une boule de métal poli, de 7 à 8 centimètres de diamètre, afin de rendre plus manifeste l'action par influence.

En se plaçant à des hauteurs différentes pour équilibrer l'instrument, on fait varier les signes de l'électricité de telle sorte que, là où les feuilles indiquaient de l'électricité positive, on peut obtenir de l'électricité négative; dans ce cas, l'électricité négative ne peut pas être attribuée à la terre. Rien n'est plus facile que d'expliquer ces effets inverses : dans le premier cas, lorsqu'on élève l'appareil, on le transporte dans une région qui est plus électrisée; par conséquent, la tige doit se comporter comme un corps à l'état naturel à l'égard du milieu ambiant; dans le second cas, c'est l'inverse : on le transporte dans une région moins électrisée. Il se passe ici le même phénomène que celui qui vient d'être décrit.

En remplaçant la boule polie par un faisceau de pointes, l'électricité dégagée par influence dans la tige s'écoule dans l'air, et ne laisse dans l'appareil que l'électricité de même nature que celle qui se trouve dans l'atmosphère. Quand l'instrument a été ainsi chargé, en le replaçant dans sa position première, l'électricité acquise fait diverger les feuilles, ce qui n'a pas lieu avec la boule.

En substituant aux pointes, comme Volta l'a indiqué, une mèche enflammée, la charge de l'appareil est encore plus rapide. Ces deux modes d'observation enlèvent au phénomène de sa simplicité, en faisant dépendre son intensité de l'humidité de l'air, de la pluie, ou de la force du vent.

Peltier a reproduit ces effets avec un globe isolé, suspendu à un plafond, et électrisé positivement ou négativement. Supposons-le d'abord électrisé positivement : on place au-dessous du globe un petit électroscope, muni d'une tige de 2 décimètres, terminée par une boule polie ou par une pointe, et on reproduit exactement les effets indiqués plus haut. Pour se rapprocher autant que possible des conditions où l'on se trouve dans l'atmosphère, on peut également disposer l'appareil comme il suit : on prend un globe en cuivre, de 40 centimètres de diamètre, ayant une ouverture de 16 centimètres, et on le place sur un plateau de résine. Dans l'intérieur on suspend un petit électroscope, isolé au moyen d'un petit bâton de gomme laque et d'un cordonnet passant dans la gorge d'une poulie mobile et d'une poulie fixe; à la platine de l'électroscope est fixé un fil métallique, en communication avec la partie inférieure du globe. Au moyen de cette disposition, on fait monter ou descendre à volonté l'électroscope dans l'intérieur du globe. L'électroscope étant placé de telle sorte que toute la tige soit dans l'intérieur, on communique au globe une électricité négative puissante, et l'on met en communication la tige, les feuilles et les armatures avec le globe, au moyen d'un fil conducteur tenu par un manche isolant. Dans ce cas, les feuilles d'or ne divergent pas, par la raison que les actions par influence étant les mêmes de toutes parts, ces feuilles doivent rester au repos. On retire le fil de communication avec le manche isolant; la tige de l'instrument est complétement isolée. On remonte ensuite l'électroscope d'un à deux décimètres; les feuilles divergent alors, en vertu de l'électricité positive; en redescendant l'électroscope, les feuilles

retombent à zéro. Si l'on met de nouveau la tige en communication avec le globe pour établir un nouvel état d'équilibre l'électromètre étant élevé, les feuilles retombent à zéro; mais si, à partir de ce point, on redescend l'appareil dans la position qu'il avait auparavant, les feuilles divergent en vertu de l'électricité négative.

Nous répéterons encore ici que l'électroscope et le multiplicateur ne peuvent donner des indications absolues, comme le thermomètre et le baromètre : les feuilles d'or ou les pailles du premier ne divergent que sous l'influence d'un état électrique différent de celui du milieu ambiant, et l'aiguille du second n'est déviée qu'en raison de la supériorité d'un courant sur un autre.

Le sol étant plus ou moins humide conduit inégalement, quoique suffisamment, l'électricité qui lui est inhérente; il n'en est pas de même de l'air qui, étant mauvais conducteur, s'en charge diversement, selon son humidité et les causes qui l'agitent. Ce n'est pas tout : les nuages électrisés agissant par influence sur la portion d'air où se trouve l'extrémité de l'instrument, altèrent pendant leur passage celle qui y est accumulée, soit en augmentant, soit en diminuant sa tension. On juge par là combien de difficultés on éprouve en cherchant à interpréter les résultats obtenus toutes les fois que l'air n'est pas serein, ou qu'il est agité.

Les expériences faites jusqu'ici sur l'électricité atmosphérique ont conduit aux conséquences suivantes :

1° La terre est électrisée négativement, l'atmosphère positivement, ou du moins se comportent l'une et l'autre comme telles. Il pourrait se faire qu'il n'y eût qu'une différence de tension électrique, les effets par influence, comme on l'a vu précédemment, expliquant les alternatives d'électricité positive et négative : mais on peut, pour la facilité des explications, supposer la terre et l'atmosphère électrisées différemment, et il sera toujours facile, quelle que soit l'hypothèse que l'on adopte sur la nature de l'électricité, d'exprimer les effets produits.

2° Tout corps placé à la surface de la terre partage son état électrique, lequel augmente d'autant plus qu'il forme une plus grande saillie au-dessus de cette surface.

3° Lorsqu'on isole un corps, après l'avoir mis préalablement en communication avec le sol, il se trouve en équilibre de tension avec ce dernier : l'électroscope à feuilles d'or n'accuse alors aucun effet; mais si le ciel est serein et qu'on élève l'appareil au-dessus du sol, les feuilles d'or divergent en vertu d'un excès d'électricité positive. En redescendant l'électroscope, le premier équilibre est reproduit et la divergence devient nulle. Si l'on se trouve sur une partie élevée du sol, il peut se faire qu'en descendant l'appareil, l'électroscope accuse l'électricité négative. Ces diverses expériences exigent que la tige soit terminée par une boule unie, afin d'éviter les effets d'influence.

4° La tension de l'électricité positive accusée par les appareils croît à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère.

5° L'action entre deux corps électrisés s'opère d'autant mieux que ces deux corps, ou l'un d'eux seulement se vaporise plus facilement ; conséquemment, l'eau à la surface de la terre, qui participe à l'état négatif de celle-ci, se vaporise avec plus de facilité sous l'influence positive de l'air, et d'autant plus que cette influence est plus considérable. Les vapeurs négatives se répandent ensuite dans l'atmosphère, suivant leur densité et la répulsion électrique propre à leurs molécules, tant que ces dernières restent à l'état de globules vésiculaires.

6° Les appareils fixes de peu d'étendue ne sont d'aucune utilité dans un temps sec et serein, attendu qu'ils restent toujours dans le lieu où ils ont été mis en équilibre, et qu'ils ne peuvent laisser échapper l'électricité retenue sur leurs parois, à cause de la sécheresse de l'air.

Il n'en est plus de même lorsqu'ils ont des longueurs considérables et qu'ils sont par conséquent très-élevés; dans ce cas, l'appareil perd son électricité d'influence.

7° Lorsque l'air est un peu humide, l'écoulement élec-

trique est favorisé, et l'on peut obtenir des courants continus avec de moindres longueurs de fil.

Il est nécessaire de se mettre en garde contre les effets électriques provenant de l'altération des conducteurs.

§ III. — *Des variations qu'éprouvent les quantités d'électricité qui se trouvent dans l'atmosphère quand le temps est serein.*

Les faits précédemment exposés montrent combien sont complexes les variations de l'électricité atmosphérique; aussi ne doit-on entreprendre des recherches à cet égard que lorsqu'on s'est bien rendu compte de toutes les causes qui exercent une influence sur les phénomènes. Il faut aussi avoir des appareils fixes, afin de pouvoir opérer toujours dans les mêmes conditions.

Dans l'atmosphère, quand le temps est serein, l'excès d'électricité positive, qui est assez faible un peu avant le lever du soleil, augmente peu à peu près de son lever, puis rapidement, et arrive ordinairement quelques heures après à son premier maximum. Cet excès diminue d'abord rapidement, ensuite lentement, et arrive à son minimum quelques heures avant le coucher du soleil; il recommence à monter dès que le soleil s'approche de l'horizon, et atteint peu d'heures après son second maximum, puis diminue jusqu'au lever du soleil; il recommence ensuite le lendemain la même marche.

Les expériences de Schubler, faites à Stuttgard, et que nous allons rapporter, ont précisé ces indications mieux qu'on ne l'avait fait avant lui; elles ont fait connaître, non-seulement les heures où les maxima et les minima ont lieu, mais encore les variations qu'ils éprouvent suivant les saisons.

Le tableau n° 1 renferme les observations faites dans le cours d'une journée; les tableaux n° 2 et 3 les observations faites à cinq époques différentes de la journée dans le courant de deux mois différents. Le tableau n° 4, la récapitulation des observations faites depuis le mois de juin 1811 jusqu'en mai 1812.

TABLEAU N° 1. — 11 MAI 1811.

HEURES.	ÉLECTROMÈTRE.	HYGROMÈTRE de Saussure.	THERMOMÈTRE.	TEMPS.
Matin.				
4 heures.	+ 5	88	+ 9,3	Parfaitement serein ; peu à peu le ciel devient vaporeux ; la rosée se forme.
5.......	+ 6 1/2	88	9,5	
6.......	+ 8	87	10,5	
7.......	+ 11	86	12,1	
8.......	+ 13	84	13,5	
9.......	+ 10	76	15,5	L'horizon s'éclaircit complétement ; la couleur du ciel devient d'un bleu pur.
10.......	8	70	17,0	
12.......	7	63	20,1	
Après-midi.				
2.......	6 1/2	61	21,6	
4.......	5 1/2	60	21,3	
5.......	5	62	20,9	
6.......	+ 6	65	20,0	Il se forme de nouveau des vapeurs et la rosée du soir.
7 1/2.....	+ 8	72	17,5	
8 1/2.....	+ 12	83	15,5	
9 1/2.....	+ 8	86	13,0	Parfaitement serein.
10 1/2.....	7	88	12,1	
12.......	6 1/2	88	11,0	

TABLEAU N° 2.

JOURS.	INTENSITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ. HEURES. 7 h. du matin.	8 h. 1/2 du matin.	2 h. du soir.	7 h. du soir.	10 h. du soir.	ÉTAT DE L'ATMOSPHÈRE. OCTOBRE 1811.
1	+ 8	+ 19	+ 8	+ 20	+ 5	Temps serein, chaud; thermomètre, le soir à 2 heures, + 16,8.
2	+ 8	+ 8	+ 38	+ 16	+ 11	A 2 heures du soir, légers nuages orageux accompagnés de pluie.
3	+ 7	+ 18	+ 9	+ 15	+ 5	Temps très-serein, clair; à 2 heures du soir, thermomètre, + 18.
4	+ 6	+ 14	+ 6	+ 38	+ 3	Le matin, clair; à 2 heures du soir, therm., + 20,7; 7 h., pluie.
8	+ 10	+ 7	+ 4	+ 25	+ 8	Couvert le matin; le soir, clair; ciel étoilé.
11	+ 5	+ 17	+ 5	+ 22	+ 10	Clair; à 2 heures du soir, thermomètre, + 18,2.
13	− 14	0	+ 6	+ 17	+ 6	Un peu de pluie jusqu'à 8 heures; le soir, clair.
16	+ 8	+ 15	+ 9	+ 22	+ 11	Clair; à 2 heures du soir, thermomètre, + 17,3.
22	+ 7	+ 13	+ 5	+ 27	+ 10	Clair; à 7 heures du soir, brouillard.
27	− 20	− 14	0	− 2	− 40	Vent du sud et pluie; baromètre très-haut.
28	+ 7	+ 9	+ 6	+ 30	+ 8	Variable; ensuite clair; 7 heures du soir, brouillard.
29	+ 4	+ 5	− 60	+ 14	+ 5	Couvert; à 2 heures, forte pluie; le soir, clair.
30	+ 5	− 6	+ 5	− 6	− 4	Couvert le matin; pluie le soir.
31	+ 5	+ 7	+ 20	+ 9	+ 5	Couvert; à 2 heures du soir, un peu de pluie; ensuite clair.
TOTAL...	+ 80 − 34	+ 132 − 20	+ 120 − 60	+ 255 − 8	+ 87 − 44	

TABLEAU N° 3.

JOURS.	INTENSITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ. HEURES. 7 h. 1/2 du matin.	9 h. du matin.	2 h. du soir.	6 h. 1/2 du soir.	10 h. du soir.	ÉTAT DE L'ATMOSPHÈRE. NOVEMBRE 1811.
1	+ 5	+ 7	+ 6	+ 12	+ 5	Couvert le matin; clair le soir.
2	+ 4	+ 14	+ 5	+ 20	+ 7	Clair; puis quelques nuages.
3	+ 5	+ 13	+ 5	+ 30	+ 10	Clair et chaud; à 2 heures du soir le thermomètre est à + 16,2.
4	+ 5	+ 13	+ 8	+ 20	+ 2	Clair; couvert le soir; à 2 heures le thermomètre est à 16,1.
12	+ 4	+ 5	— 50	+ 7	+ 4	Couvert; à 2 heures du soir, pluie.
15	+ 4	0	+ 3	— 20	+ 3	Couvert; le soir pluie.
19	+ 6	+ 20	+ 28	+ 17	+ 7	Clair, froid, brouillard; le matin, thermomètre à — 2,3.
22	+ 7	+ 13	+ 7	+ 14	+ 6	Clair, froid; le matin, thermomètre à — 2,6.
26	+ 10	+ 13	+ 15	+ 17	+ 11	Variable; couvert la plupart du temps; brouillard.
27	+ 7	+ 13	+ 20	+ 14	+ 17	Couvert et quelques brouillards.
28	+ 11	+ 14	+ 9	+ 17	+ 5	
29	+ 7	+ 7	+ 15	+ 13	+ 4	
30	+ 3	+ 4	+ 21	+ 13	+ 8	
TOTAL...	+ 78	+ 138	+ 142 / — 50	+ 194 / — 20	+ 89	Le plus souvent couvert, nébuleux; vent du nord, sans toutefois que le temps fût très-froid.

Les observations consignées dans le tableau n° 1 indiquent un premier minimum à 4 heures du matin, un premier maximum à 8 heures, un deuxième minimum à 5 heures du soir, et un deuxième maximum à 8h 1/2.

En prenant des moyennes pour chaque mois, on obtient les résultats suivants : en juin, au commencement, les maxima se sont montrés le plus souvent vers 7 heures du matin, 9 heures et 9h 1/2 du soir, tandis qu'à la fin du mois ils ont eu lieu à 6 heures du matin et à 10 heures du soir.

En juillet, les périodes électriques ont été peu prononcées dans la première moitié, en raison de l'état de l'atmosphère; mais dans la deuxième moitié, les deux maxima se sont montrés à 7 heures du matin, à 9 heures et à 10 heures du soir.

En août, à partir du 10, époque où le temps est devenu clair, les maxima se sont montrés à 8 heures du matin et à 8h 1/2 du soir; en septembre, à 8h 1/2 du matin et à 7h 1/2 ou 8 heures du soir.

En octobre, il y a eu quelque divergence, mais de peu d'étendue : le 8, les maxima ont eu lieu à 7 heures du matin et à 7 heures du soir, et les deux minima à 2 heures et 10 heures du soir; le 16, les deux premiers à 8h 1/2 du matin et à 7 heures du soir, et les deux derniers à 2 heures et à 10 heures du soir.

En novembre, les deux maxima ont eu lieu à 9 heures du matin et à 6h 1/2 du soir, et les deux minima à 7h 1/2 du matin et à 10 heures du soir.

En récapitulant toutes les observations faites relativement à la force de l'électricité suivant les saisons, Schubler a été conduit aux conséquences suivantes : les deux maxima et les deux minima vont en croissant depuis le mois de juillet jusqu'au mois de janvier inclusivement, de sorte que la plus grande intensité a lieu en hiver et la plus faible en été; aussi trouve-t-on dans les mois d'hiver que par les jours sereins, l'augmentation d'intensité de l'électricité atmosphérique est toujours en rapport avec l'accroissement du froid. Les moyennes

des douze mois apprennent que le premier minimum et le premier maximum ont un peu moins d'intensité que les deuxièmes maximum et minimum.

M. Arago, qui a fait aussi des observations suivies sur l'électricité atmosphérique pendant les jours sereins, a également constaté l'existence de deux maxima et deux minima chaque jour. Il a trouvé dans le mois de mars 1830 :

Le 3, un premier minimum à 7h 20′ du matin; un premier maximum à 9 heures;

Le 4, un premier minimum à 7h 10′ environ, un premier maximum à 8h 15′;

Le 6, le premier maximum à 9h 15′ du matin.

Le 14, id. à 9 heures;

Le 16, id. à 9 heures;

Le 20, id. à 8h 10′;

Le 28, id. à 9 heures.

La moyenne relative au premier maximum est d'environ 8h 48′ du matin; or, Schubler avait trouvé pour le mois de mars 1811, 8h 1/2; on peut donc dire que, dans ce mois, l'électricité atmosphérique atteint le premier maximum entre 8 et 9 heures du matin.

Il est facile d'interpréter les causes qui font varier l'excès d'électricité libre dans l'air toutes les fois que le temps est serein. Schubler avait d'abord émis l'opinion que ces variations dépendaient peut-être de la même cause qui produit celles de l'aiguille aimantée; il n'y a probablement pas d'autre rapport entre ces deux classes de phénomènes qu'en ce qu'ils suivent tous deux la période diurne. Voici comment on conçoit les variations de l'intensité électrique dans le cours de la journée: vers la fin de la nuit, l'électricité doit avoir une très-faible intensité, parce que l'humidité de la soirée précédente et celle de la nuit qui l'a suivie ont transmis à la terre une partie de l'électricité qui s'était accumulée dans l'air. Quand le soleil commence à réchauffer la terre, les vapeurs s'élèvent, et il n'y a plus d'écoulement vers le sol; lorsque cet astre est parvenu à un certain degré d'élé-

vation, la chaleur augmente, l'air se dessèche et ne transmet qu'avec peine le fluide électrique accumulé dans l'atmosphère; il en résulte que les appareils électriques situés près de la surface de la terre indiquent une diminution de l'électricité, bien que le fluide électrique ne cesse point de s'accumuler dans les régions élevées. Le soleil s'approchant de l'horizon occidental, l'air se refroidit, devient humide et commence à transmettre plus abondamment à la terre, qui s'est refroidie plus que l'air, le fluide électrique accumulé dans les régions supérieures. L'intensité électrique doit donc augmenter avec l'humidité et la rosée jusqu'à 2 ou 3 heures après le coucher du soleil; elle diminue ensuite graduellement pendant une grande partie de la nuit, et ne devient jamais nulle, lors même que le ciel est parfaitement serein.

On explique suivant le même principe pourquoi l'électricité aérienne dans les temps sereins est beaucoup moins forte en été qu'en hiver : l'air, dans le premier cas, étant alors chaud et sec, résiste avec plus de force à l'écoulement du fluide électrique accumulé dans les régions supérieures de l'atmosphère, tandis qu'en hiver, l'air humide doit produire un effet contraire. Ce sont donc les variations de l'humidité dans le courant de la journée qui donnent lieu aux variations de tension électrique.

SECTION II.

DE L'ÉLECTRICITÉ DES NUAGES ET DE LA FORMATION DES ORAGES.

---

§ Ier. — *De l'électricité des nuages.*

Phénomènes généraux. — Quand le ciel n'est pas serein, il arrive fréquemment que les électromètres et les multiplicateurs accusent la présence dans l'air tantôt de l'électricité positive, tantôt de l'électricité négative. Il suffit pour s'en convaincre de lancer un cerf-volant

après l'avoir mis en communication avec les appareils, pour voir ceux-ci indiquer l'une ou l'autre électricité lorsque le cerf-volant traverse un nuage, en sort pour rentrer dans un autre, et ainsi de suite.

Il paraît que l'on peut observer des effets analogues sans que le cerf-volant traverse des nuages. Nous citerons comme exemple l'expérience faite par Peltier, près de Corbeil, le 21 avril 1840, par un temps assez beau. (Peltier, *Des trombes*, page 7). Il enleva un cerf-volant attaché à un fil métallique dont l'extrémité pouvait être mise en relation avec un des bouts du fil d'un multiplicateur de 3000 tours très-sensible, l'autre bout communiquant avec une tige en cuivre enfoncée de 3 décimètres dans le sol. Depuis le sol jusqu'à 50 mètres, l'électricité de l'atmosphère était positive, à cette hauteur, l'aiguille du galvanomètre marquait zéro; le cerf-volant montant toujours, l'aiguille indiqua une zone négative d'une épaisseur de 20 mètres, au-dessus de laquelle des signes positifs reparurent; puis au-delà l'aiguille aimantée indiqua un accroissement rapide d'intensité d'électricité positive.

Schubler, dans les observations suivies de juin 1811 à mai 1812, dont il a été question plus haut, a été conduit aux conséquences générales suivantes :

1° Quand le temps est couvert, l'excès d'électricité qui se trouve dans l'air est encore positif; la force ou la tension de l'électricité est plus grande en hiver qu'en été.

2° Pendant les orages, lorsqu'il pleut ou qu'il neige, l'électricité est tantôt positive, tantôt négative; pour 71 jours positifs, il y en a eu 69 négatifs.

3° Il arrive souvent que l'électricité change de signe dans la journée par le passage de nuages possédant l'une ou l'autre électricité.

Quelquefois la tension de l'électricité est tellement forte, que la pluie peut être étincelante. On a plusieurs exemples de ce phénomène; nous nous bornerons à rapporter le fait suivant, consigné par Taldo, dans son *Es-*

sai météorologique, page 274 : Le 22 septembre 1773, il tomba dans la Gothie orientale, dans un district nommé Scarra, une pluie des plus abondantes à laquelle succéda une chaleur accablante qui dura jusquà six heures du soir ; à ce moment la pluie commença à retomber, mais d'une manière très-singulière, car chaque goutte jetait du feu en tombant sur la terre.

En général, tous les nuages sont électrisés ; ils ne diffèrent entre eux et ne se distinguent des nuages orageux que par la tension plus ou moins grande de l'électricité qu'ils renferment. Pour donner une idée de la haute puissance électrique de certains nuages, même lorsqu'ils ne manifestent presque aucun effet, nous croyons devoir citer les résultats obtenus en 1757, par Romas, avec un cerf-volant de 2 mètres 1/3 de hauteur sur 1 mètre de largeur, lancé dans les nuages à une hauteur de 183 mètres avec une corde dans laquelle il avait enlacé un fil de métal. (*Académie des sciences, savants étrangers*, t. II, p. 393, et t. IV, p. 514.)

« Les effets électriques du même cerf-volant ont été « bien autre chose, dans une expérience que je fis le 16 « de ce mois, pendant un orage que j'ose dire n'avoir « été que médiocre, puisqu'il ne tonna presque point et « que la pluie fut fort menue. Imaginez-vous de voir « des lames de feu de neuf ou dix pieds de longueur et « d'un pouce de grosseur, qui faisaient autant ou plus « de bruit que des coups de pistolet : en moins d'une « heure j'eus certainement trente lames de cette dimen- « sion, sans compter mille autres de sept pieds et au- « dessous. Mais ce qui me donna le plus de satisfaction « dans ce nouveau spectacle, c'est que les plus grandes « lames furent spontanées, et que, malgré l'abondance du « feu qui les formait, elles tombèrent constamment sur « le corps non électrique le plus voisin. Cette constance « me donna tant de sécurité, que je ne craignis pas d'ex- « citer ce feu avec mon excitateur dans le même temps « que l'orage était assez animé, et il arriva que lorsque « le verre dont cet instrument était construit n'eut que

« deux pieds de long, je conduisis où je voulus, sans sen-
« tir à ma main la plus petite commotion, des lames
« de feu de six à sept pieds avec la même facilité que
« je conduisais des lames qui n'avaient que sept à huit
« pouces. »

Les nuages plus ou moins électrisés doivent éprouver divers genres d'action de la part des montagnes, qui sont elles-mêmes électrisées différemment. Il faut probablement rapporter à cette cause les effets observés dans les Andes par M. Boussingault, qui a eu occasion de remarquer des nuages parasites immenses en largeur et venant s'attacher à la partie moyenne des cônes de trachyte; ces nuages y adhéraient, et le vent ne pouvait les en détacher; la foudre sillonnait cette masse de vapeurs, et de la grêle mêlée de pluie ne tardait pas à inonder le bas de la montagne. Rien ne s'opposait alors à ce que la grande quantité d'électricité que possédaient les nuages entourant la cime de ces montagnes, n'exerçât sur ces dernières une puissance attractive d'autant plus considérable qu'elles étaient dans un état électrique contraire.

Des nuages orageux positifs. — On explique l'électrisation positive des nuages sans difficulté. Considérons le nuage à l'instant où il se forme dans un air tranquille et possédant, comme on le sait, un excès d'électricité positive; cette électricité se réunit en couches très-minces à la surface de chaque globule vésiculaire que l'on peut considérer comme bon conducteur. Dans le cas où l'électricité est faible et où les globules sont peu rapprochés, il n'en résulte aucun effet particulier, et le nuage n'est pas encore orageux : seulement il paraît plus fortement électrisé que l'air environnant, parce qu'il est plus conducteur; si le nuage est très-dense, les vésicules qui le composent sont plus rapprochées, et on peut alors le considérer comme un conducteur continu : toute l'électricité qui se trouvait dans l'intérieur se porte donc à la surface, où elle est tenue en équilibre par la pression de l'air ambiant. Il suit de là que lorsqu'un nuage orageux se forme par la réunion des globules

vésiculaires, il doit renfermer autant d'électricité que la masse d'air qui lui a fourni tous les globules vésiculaires; le nuage ayant une certaine étendue, on conçoit comment une très-faible quantité d'électricité, d'abord disséminée dans un grand espace, acquiert une tension énorme quand elle se porte à la surface du nuage.

D'après l'état électrique ordinaire de l'atmosphère, les nuages ainsi formés doivent être chargés d'électricité positive. Quand ces nuages sont poussés par les vents, ils perdent leur électricité dans leur cours, et cessent alors d'être orageux.

Des nuages orageux négatifs. — Les nuages orageux pouvant être ou positifs ou négatifs, examinons quelle peut être l'origine des nuages négatifs. Les effets électriques qu'on observe auprès des cascades indiquent un des modes de formation de ces nuages. Si l'on présente un électromètre atmosphérique non armé de sa tige métallique à la pluie très-fine qui résulte de l'éparpillement de l'eau dans le voisinage d'une cascade, on obtient aussitôt des signes d'électricité négative. Volta a constaté ce fait, qui avait été observé avant lui par Tralles, non-seulement au-dessus des grandes cascades, mais encore près des ruisseaux qui se brisent en tombant sur des rochers. Il obtint également des signes d'électricité négative sur les bords d'un torrent parcourant un ravin, là où ce torrent était le plus impétueux.

Ces effets montrent que l'eau, en tombant avec une grande vitesse sur des rochers, s'éparpille en globules qui emportent avec eux dans l'atmosphère l'électricité négative inhérente à ces rochers, et par suite à la terre. On ne peut admettre que ce phénomène soit dû au frottement de l'eau sur les rochers, puisque la surface de ceux-ci est constamment humide; du reste, l'eau ne donne d'effet électrique de frottement que lorsqu'elle est à l'état de vapeur à une température élevée, et qu'elle vient frapper des corps analogues aux parois métalliques d'une chaudière à vapeur.

Les résultats suivants obtenus par de Saussure vien-

nent encore prouver que des vapeurs ou des nuages qui s'élèvent de la terre peuvent être électrisés. De Saussure se trouvait, le 29 juin 1766, sur le sommet du môle, à dix heures du matin ; le vent venait du sud ; le temps était serein, à l'exception de quelques légers nuages répandus çà et là. Il avait remarqué que le soleil, dont les rayons frappaient la montagne, faisait sortir de son pied et des prairies adjacentes de petits nuages blancs qui s'élevaient et se dissipaient bientôt après, ou allaient rejoindre d'autres nuages qui flottaient au-dessus de sa tête. Quand aucun nuage ne passait auprès de son électromètre, il n'observait aucun signe d'électricité. Il en était encore de même lorsqu'un de ces nuages était assez grand pour envelopper tout le conducteur depuis sa pointe jusqu'à la terre; mais aussitôt qu'il venait raser la pointe du conducteur, ou même passer un peu au-dessus sans toucher en même temps à la terre, il obtenait des signes d'électricité, faibles à la vérité, mais non équivoques. Les nuages ne donnaient aucun signe d'électricité au conducteur quand ils communiquaient avec la terre; dans ce cas, la décharge s'opérait immédiatement dans celle-ci. Ces faits indiquent que les nuages qui s'élèvent de la terre peuvent être électrisés de même que le sont les gouttelettes d'eau qui se trouvent dans le voisinage des chutes d'eau, et tendent à montrer, comme il a déjà été dit page 471, que les vapeurs qui se forment à la surface du globe emportent une partie plus ou moins considérable de l'électricité négative que possède ordinairement la terre.

On peut se demander maintenant s'il ne se forme pas spontanément dans l'atmosphère des nuages chargés d'électricité négative en raison d'action par influence, comme on est porté à le croire, lorsque l'on voit, dans les temps d'orage, les nuages positifs et négatifs se succéder rapidement. Cette influence nous est démontrée surtout par les effets qu'on appelle choc en retour, dont il sera question plus loin, et qui montrent que la terre peut être dans un état électrique autre que celui qui lui est propre, en raison d'une action exercée par un

nuage électrisé. Rien ne s'oppose donc à ce qu'un nuage dense et fortement positif exerce une action à distance sur un nuage faiblement électrisé, ou qui ne l'est point du tout, et en communication avec la terre; dans ce cas, l'électricité positive de ce second nuage est chassée dans la terre, tandis que l'électricité négative est transportée sur la surface la plus voisine du nuage dense; si alors une cause quelconque vient à rompre la communication avec la terre, ce nuage se trouve électrisé négativement.

Le dégagement de l'électricité par influence peut encore intervenir comme il suit, pour donner lieu à des nuages négatifs : La terre exerçant toujours une influence négative et l'atmosphère une inflence positive sur un nuage, il s'ensuit que ce dernier, quand il est à peu de distance de la terre, doit être plus fortement négatif à sa partie supérieure que dans les parties moins élevées; une augmentation de température pouvant dissiper la partie inférieure du nuage, la partie supérieure restera électrisée négativement, et cette fraction de nuage, repoussée par la terre, constituera un nuage négatif.

D'après le mode de formation des nuages positifs et négatifs, il résulte qu'une condensation de vapeurs est toujours accompagnée d'électricité, et que la pluie doit toujours manifester des signes électriques.

Hauteur des nuages orageux. — Les nuages orageux sont situés à des hauteurs diverses; certaines roches qui forment la partie culminante des plus hautes montagnes, portent souvent les traces de fusion et de vitrification opérées par la foudre; ces effets de fusion ont été observés au sommet de la montagne de Toluca, par M. de Humboldt, à 4620 mètres au-dessus du niveau de la mer. On peut donc dire que des orages peuvent se former à cette hauteur et même au-delà. On comprend aisément qu'ils puissent être assez élevés, quand on remarque qu'en été ils commencent habituellement par des cirrus. (Voyez page 386.)

On dit cependant, en général, que les nuages orageux sont assez bas, mais il ne faut pas confondre le

nuage orageux, centre de l'orage, avec les nuages peu élevés qui se forment au-dessous de lui. Nous ne pouvons mieux faire que de citer à l'appui de notre opinion la relation d'un orage observé par M. Kaemtz, sur le Rigi, à 1800 mètres au-dessus du niveau de la mer : « ... Des cirrus s'épaissirent vers midi, des cumulus isolés « passaient au-dessus de ma tête. L'après-midi, un orage « se forma dans la partie supérieure de la vallée de Sar- « nen..... Le Rigi était dégagé de nuages, il y en « avait seulement quelques-uns sur le mont Pilate, « qui s'élève à 2044 mètres au-dessus de la mer. Je pus « voir le long des flancs de cette montagne les effets « du courant descendant d'air froid : non-seulement les « nuages grossissaient rapidement autour de son som- « met, mais des masses isolées roulaient avec une ex- « trême vitesse le long de ses pentes, semblables à des « boules colossales qu'on aurait précipitées du haut de « la montagne; dans le bas, elles disparaissaient ou se « mouvaient horizontalement : en même temps le ton- « nerre éclatait avec plus de force..... Cependant le « vent était devenu plus vif sur le sommet où je me « trouvais, les nuages s'élevaient le long du flanc occi- « dental, l'orage s'approchait de mon zénith; il était à « une grande hauteur. Au bout de quelques minutes, « les nuages descendirent jusqu'à moi, et je me trouvai « enveloppé de brouillards; le tonnerre grondait et les « éclairs brillaient à une faible distance. Des voyageurs « m'assurèrent ensuite avoir trouvé les nuages à plus « de 300 mètres au-dessous du sommet. En considérant « seulement ces nuages, on ne donnerait à cet orage « qu'une hauteur de 1300 mètres tout au plus, mais ce « que nous avons vu plus haut prouve qu'il dépassait « 2000 mètres. » — Ainsi, les hauteurs des nuages orageux sont très-variables et sont à peu près celles où se tiennent les cumulus. (Voyez page 388.)

Couleur des nuages orageux.— Peltier prétend avoir toujours observé que les nuages fortement chargés d'électricité négative ont une teinte grise-plombée ou ar-

doise, tandis que les nuages positifs sont blancs, rosés, ou orangés. Il assure avoir remarqué que, lorsque la teinte de ces derniers nuages se présente après plusieurs jours pluvieux, c'est un indice d'amélioration dans le temps, tandis que le contraire a lieu quand cette teinte se manifeste à la suite de beaux temps, attendu qu'elle indique un commencement de condensation de vapeur. Quand on aperçoit un nuage d'une teinte bleue plombée en tête et blanchâtre à la suite, on est certain de trouver successivement les signes de chacune des deux électricités.

Jusqu'ici personne n'a confirmé ni infirmé les faits avancés par Peltier; avant de les admettre, il est à désirer que de nouvelles observations viennent en justifier l'exactitude.

Influence de l'électricité sur la formation des vapeurs.— Dans le siècle dernier, on s'est beaucoup occupé de l'influence de l'électricité sur l'évaporation. On a reconnu d'abord, qu'en raison de sa force répulsive, elle accélérait l'écoulement des liquides dans les tubes capillaires. On a observé ensuite qu'en remplissant de liquide deux vases de métal, dont l'un était électrisé et l'autre ne l'était pas, l'évaporation était plus grande dans le premier que dans le second. Beccaria a constaté que de deux vases semblables contenant de l'eau de Seine, celui qui était électrisé avait perdu 10 grains, et l'autre seulement 3. En opérant avec de l'essence de térébenthine ou avec de l'alcool, la différence entre les deux quantités de liquide évaporé a été égale à 10 grains; avec l'ammoniaque, elle s'est trouvée de 13 grains. Le même physicien a avancé, en outre, que l'évaporation n'était accélérée que lorsque l'air seulement ne possédait pas la même électricité que celle du vase.

Peltier a repris ces expériences, en opérant comme il suit, non-seulement avec de l'eau à la température ordinaire, mais encore avec de l'eau chaude afin d'avoir de la vapeur visible. On place une capsule de platine sur un trépied thermo-électrique en rapport avec un multiplicateur. Quand les effets de refroidissement produits

par l'évaporation sont arrivés à leur maximum, on interrompt la communication avec le multiplicateur, on isole le trépied, et l'on maintient la capsule pendant quelques minutes dans un état négatif assez fort; on rétablit ensuite la communication avec le circuit, et l'on trouve que l'abaissement de température est plus considérable, effet qui ne peut provenir que de ce que l'évaporation spontanée est devenue plus grande sous l'influence de l'électricité. En enlevant à la capsule son électricité, l'aiguille du multiplicateur revient peu à peu à la position qu'elle occupait primitivement.

Si l'on pose la capsule remplie d'eau distillée sur un support isolant et que l'on suspende au-dessus un corps électrisé positivement, la capsule devient positive et la vapeur qui s'en échappe possède l'électricité négative. On reconnaît en même temps que la présence de ce corps électrisé positivement augmente notablement la quantité de vapeur formée. En substituant à la boule un faisceau de pointes, l'évaporation est triplée. Pour savoir si l'électricité n'agit pas par hasard par suite des courants d'air qu'elle peut exciter, il est nécessaire d'opérer successivement au milieu de l'air agité avec un volant, puis ensuite sur la capsule électrisée. L'eau ayant été échauffée jusqu'à près de 100°, la capsule fut placée sur le conducteur préparé pour l'électrisation, au-dessous du faisceau de pointes et près du volant, de sorte que l'on pouvait agir tantôt avec le volant, tantôt avec l'électricité : dans l'un et l'autre cas, la quantité de vapeur s'est trouvée augmentée, mais plus fortement lorsque l'eau était électrisée que lorsque l'air était agité. L'électricité agit donc indépendamment de l'agitation de l'air; on se rend compte de cet effet en remarquant que chaque particule de vapeur qui s'échappe du liquide étant entourée d'une atmosphère d'électricité de même nature que celle du liquide, est repoussée, puis se trouve remplacée par une autre, et ainsi de suite, de sorte que l'évaporation est accélérée; les résultats sont les mêmes en opérant à la température ordinaire.

Peltier, pour mieux montrer l'influence de l'électricité sur les vapeurs qui se forment à la surface de la terre, a placé au-dessous d'un globe électrisé une capsule métallique dans laquelle se trouvait de la résine destinée à produire de la fumée; en se formant, celle-ci prend ordinairement de l'électricité positive. Lorsque le globe est positif, la fumée est chassée avec force et produit divers effets dépendant de centres d'action particuliers; si la sphère est négative, la fumée est attirée, elle la touche, s'en éloigne aussitôt et fait place à d'autres vapeurs qui viennent la frapper et tourbillonner ensuite en fuyant. Mais en substituant à la surface unie une surface rugueuse ou armée de pointes, la fumée n'a plus besoin alors de monter jusqu'au corps électrisé pour opérer la neutralisation des deux électricités, elle est chassée aussitôt au loin et produit des courants horizontaux du centre à la circonférence.

Sur la terre, il doit se produire des actions semblables, puisqu'elle est dans un état négatif et que l'air possède, dans les temps ordinaires, un excès d'électricité positive: ainsi, les vapeurs qui se forment à la surface de la terre, sous un ciel serein, sont nécessairement négatives, et restent telles, tant qu'il n'y a pas d'effets secondaires; elles s'élèvent, en raison de leur faible densité, de la force répulsive de la terre et de la force attractive de l'air, jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre la pesanteur et les forces attractives et répulsives de l'électricité. Si l'évaporation continue, les vapeurs négatives finissent par occuper les régions supérieures; Peltier conclut de là que les nuages négatifs sont plus élevés que les nuages positifs.

Peltier assure encore que la présence d'un nuage blanc au-dessus du sommet d'une montagne, en raison de son action sur la terre, provoque une évaporation active sur ses flancs; mais comme la quantité de vapeur produite dépasse le point de saturation, il en résulte un amas de globules vésiculaires produisant un nuage gris cendré chargé d'électricité négative. La teinte grise ne

reste pas longtemps uniformément la même partout; la partie supérieure devient plus foncée, parce que cette partie est plus négative que l'autre, en raison de sa plus grande proximité du nuage positif.

Un nuage gris placé au-dessus de la montagne produit des effets analogues, mais en sens inverse; ainsi le nuage qui se forme est blanc et chargé d'électricité positive; puis il perd peu à peu son éclat et devient gris.

Il paraîtrait, suivant Peltier, que cet état de choses se produirait encore dans les temps sereins et expliquerait les variations horaires de l'électricité atmosphérique. D'après cette hypothèse, vers le soir et pendant la nuit, les vapeurs se condensent, et il en résulte une nouvelle distribution de l'électricité sous l'influence du globe; au lever du soleil, l'évaporation recommence et les vapeurs élastiques se dilatent de nouveau; les premières vapeurs formées sont les plus négatives, les dernières le sont moins, et sont dès-lors positives par rapport aux premières; elles forment ainsi des nuages électrisés différemment en se refroidissant.

§ II. — *De la formation des orages.*

Les nuages orageux, ceux qui produisent des éclairs et font entendre le tonnerre, sont en général denses, isolés et d'une grande étendue. Ils se forment ordinairement dans les saisons chaudes, par un temps humide; en effet, l'air, parvenu au terme d'humidité extrême, abandonne, par un abaissement de température de quelques degrés, une quantité d'eau beaucoup plus grande que par un abaissement égal à une température moindre : c'est pour ce motif que la formation des nuages orageux est plus fréquente en été qu'en hiver.

La formation des orages peut être due à deux causes : 1° à un courant ascendant de vapeur qui vient se condenser dans une région plus froide; 2° à la rencontre de deux courants d'air opposés. En général, la première cause donne lieu aux orages pendant l'été, et les orages que l'on observe l'hiver doivent être rapportés à la seconde; dans

tous les cas, une condensation rapide de vapeur est la condition essentielle de la production d'un orage. Il ne faudrait pas conclure de là que toute condensation de vapeur suivie de pluie abondante soit la cause d'un orage; cette condensation est bien accompagnée d'électricité, mais la tension n'est pas assez puissante pour donner lieu à des éclairs et au tonnerre; les nuages qui sont produits dans cette circonstance ne diffèrent donc des orages que par la quantité d'électricité qu'ils renferment.

Dans nos climats, l'été, les orages se forment habituellement par un temps chaud et calme et par un ciel serein; la terre humide étant fortement échauffée par les rayons solaires, il en résulte un courant ascendant rapide de vapeurs qui s'élève et vient se condenser dans les parties élevées de l'atmosphère; il peut se produire alors un nuage dense et volumineux qui est fortement électrisé. Lorsque les orages se forment ainsi, ils ont lieu le plus habituellement à l'instant de la plus forte chaleur du jour, et ensuite le ciel peut redevenir serein; mais ce qu'il faut remarquer, c'est que quelquefois, dans la même localité, il se reproduit un orage plusieurs jours de suite jusqu'à ce que les vents et les circonstances atmosphériques aient changé. Volta a le premier signalé cette périodicité qui n'a lieu que pour les orages dus aux courants ascendants, et nullement pour les orages produits par la lutte de deux vents opposés.

Quand l'orage est sur le point d'éclater, les nuages qui le recèlent, suivant Beccaria, éprouvent une espèce de fermentation dont les autres nuages sont privés. Ces nuages, ordinairement très-denses, s'élèvent assez rapidement de quelques points de l'horizon; ils sont terminés par un grand nombre de contours curvilignes et nettement terminés; ils se gonflent, diminuent de nombre et augmentent de grandeur, tout en restant attachés invariablement à leur première base. Entre eux et l'horizon, on aperçoit un gros nuage très-sombre, par l'intermédiaire duquel ils semblent communiquer avec la terre; on voit en outre se former d'autres nuages sous l'apparence de

longs rameaux, et qui, sans se détacher de lui, couvrent graduellement le ciel. Indépendamment de ces rameaux, de ces lambeaux de nuages, on aperçoit çà et là dans l'atmosphère des nuages légers, dont les mouvements sont brusques, incertains et irréguliers, et que Beccaria a appelés *ascitizi* ou nuages additionnels.

Tels sont les effets qui se passent sur la face du nuage tournée vers la terre; mais, quand on est en position d'examiner la face supérieure, on voit que même lorsqu'une couche de nuages semble unie et parfaitement de niveau sur sa surface inférieure, la surface opposée présente de très-hautes protubérances et de profondes cavités.

Dans les orages, on observe toujours des courants d'air sur les côtés se dirigeant vers les nuages, courants qui se trahissent par les mouvements des petits nuages; sur le sol, on remarque des courants divergents dans différents sens à partir du nuage comme d'un centre; ces courants sont dus en grande partie aux différences de température, et ceux qui se dirigent vers la terre et qui sont froids proviennent des masses d'air refroidies se précipitant de haut en bas au-dessous du nuage. Il peut se faire que les attractions et les répulsions électriques qui se manifestent à la rencontre de nuages chargés de la même électricité ou d'électricité contraire occasionnent des effets analogues.

Lorsque les nuages orageux chargés d'électricité contraire se trouvent dans leur sphère d'activité réciproque, de longues étincelles commencent à éclater, même à de grandes distances. Si l'on joint aux attractions et répulsions des nuages l'action des vents contraires qui tendent à leur imprimer des mouvements de rotation et de translation en différents sens, on concevra facilement pourquoi les nuages affectent souvent des formes si bizarres et sont animés de mouvements désordonnés à l'instant où l'éclair brille.

Tels sont les signes avant-coureurs de l'orage, quand il est encore éloigné; mais aussitôt que les nuées sont à une distance convenable de la terre, le bruit des dé-

charges électriques se fait entendre, la foudre gronde et ses retentissements se prolongent au loin.

Si les causes qui donnent lieu à la formation des orages sont purement locales, ceux-ci étant formés dans un espace circonscrit, sont transportés par les vents, éclatent sur leur passage, et finissent par s'épuiser sans s'étendre de tous côtés; mais si ces causes embrassent une certaine étendue de pays, alors les nuages électriques, d'abord circonscrits, s'étendent en tout sens, et parviennent à couvrir de vastes surfaces. Nous citerons à ce sujet un orage dont M. Kaemtz a été témoin sur le Faulhorn; voici la relation que ce météorologiste en a faite :

« A 7 heures, tout l'ensemble des nuages avait une « apparence orageuse; ils s'étendaient uniformément, « passant par mon zénith, jusqu'à la chaîne qui est entre « la Jung-Frau et le Wetterhorn. Les éclairs commençaient « d'abord dans la vallée de Schwitz, et se propageaient « de proche en proche vers l'est. Bientôt il s'établit des « éclairs permanents en cinq points de cette masse de « nuages, qui s'étendait sans interruption du lac de Ge-« nève à Schwitz et Glaris. Sur le soir, je vis aussi des « éclairs en Allemagne et en France; mais ces derniers « étaient trop éloignés pour que je pusse les observer « convenablement. Il résulte à mes yeux, des observa-« tions que je fis pendant plusieurs heures, que l'électri-« cité qui paraissait aux divers points de cette masse de « nuages était en communication intime. Pour environ « un tiers des éclairs, la marche du phénomène était la « suivante : l'éclair partait d'abord dans le canton de « Vaud et éclairait fortement, comme à l'ordinaire, la « couche inférieure; peu de secondes après, souvent « presque immédiatement, on voyait briller, dans le voi-« sinage du Rinderhorn, un second éclair à plusieurs traits « rayonnant vers le bas; ensuite il s'en montrait au-des-« sus de Berne, qui ne faisaient qu'éclairer fortement le « nuage; puis un trait de feu paraissait par le bas, dans « la direction de Lucerne, et il était suivi d'un autre « dans la direction de Schwitz. »

Quelques observateurs ont avancé qu'un petit nuage isolé ne saurait être orageux ; voici ce que rapporte à cet égard M. Duperrey (Becquerel, *Traité de l'électricité*, t. VI, p. 401) : « Étant dans le détroit d'Ombay, en « novembre 1818, nous vîmes un soir un petit nuage « blanc qui lançait la foudre de tous les côtés. Il montait « avec lenteur malgré la force du vent, et se trouvait à « une grande distance de tous les autres nuages qui « paraissaient comme fixés à l'horizon. Ce nuage était « d'une forme arrondie et pouvait occuper en surface « une étendue égale à la surface apparente du soleil. « De tous les points de ce nuage s'échappaient des éclairs « en zig-zag, et une multitude de détonations successives « imitaient parfaitement le bruit de la mousqueterie de « tout un bataillon auquel on aurait commandé de faire « feu à volonté. Ce phénomène ne dura pas moins d'une « demi-minute et disparut complétement avec les der- « nières détonations. » M. Arago (*Annuaire de* 1838, p. 234) cite plusieurs observations analogues; du reste, on ne voit pas pourquoi des petits nuages isolés ne seraient pas orageux comme des nuages plus étendus.

Enfin pour montrer que dans certaines circonstances locales il se manifeste des effets électriques analogues à ceux que produisent les orages, nous rappellerons que les phénomènes de la foudre s'observent également dans les nuées qui sortent du cratère des volcans; cet ensemble de fumée et de flamme sillonné par la foudre est un des spectacles les plus imposants que présente la nature.

§ III. — *De la distribution des orages à la surface du globe et suivant les saisons.*

Les orages se montrent plus fréquemment et sont plus violents sous les tropiques dans la saison des pluies ou lorsque les moussons changent, que dans d'autres régions.

« En Amérique, la saison des orages, pour un lieu situé « entre les tropiques, dit M. Boussingault (*Annales de « physique et de chimie*, t. LVII, p. 180), commence

« précisément à l'époque où le soleil s'approche du zénith. « Toutes les fois que la latitude d'un point de la zone « équinoxiale est de même dénomination et égale à la « déclinaison du soleil, il doit se former un orage sur « ce point. Dans de semblables circonstances, le ciel, « dans la matinée, est souvent d'une pureté remarqua- « ble, l'air est calme, la chaleur du soleil insupportable ; « vers midi, des nuages commencent à s'élever sur l'ho- « rizon, l'hygromètre ne marche pas au sec, il reste « fixe ou s'avance même quelquefois vers l'humidité. « C'est toujours après la culmination du soleil que le « tonnerre se fait entendre; il est ordinairement précédé « d'un vent léger, et bientôt la pluie tombe par tor- « rents. Or il y a toujours à chaque instant sur la sur- « face de la zone torride, quelle que soit d'ailleurs la « position que le soleil occupe sur l'écliptique, un point « qui est placé dans les conditions sous lesquelles les « orages se produisent infailliblement. Nous devons donc « nous figurer l'atmosphère de l'équateur comme sil- « lonnée continuellement par le feu électrique. Au reste, « on peut s'assurer, en recueillant dans un grand nombre « de localités différentes la date des saisons orageuses, « que les choses doivent se passer ainsi. Lorsque, sur les « plateaux élevés des Cordillères, le ciel est découvert « pendant la nuit, on aperçoit toujours dans le lointain « et à l'ouest des éclairs qui se succèdent sans interrup- « tion : ce sont des orages qui éclatent sur les points « qui ont une longitude plus occidentale. » Cependant, il est des localités où il ne tonne pas; sur les côtes du Pérou, à Lima par exemple, il n'y a ni éclairs ni tonnerre.

Dans nos climats, les orages n'ont lieu, en général, que dans la saison chaude, et en avançant dans les continents, leur nombre semble être en rapport avec la quantité de pluie qui tombe; du reste, il est des exceptions, comme on va le voir plus loin.

En approchant davantage vers les pôles, le nombre des orages diminue; ainsi, par exemple, dans les mers

du Spitzberg, le capitaine Philippe, depuis la fin de juin jusqu'à la fin d'août 1773, n'a entendu aucun coup de tonnerre ni vu d'éclairs. L'Islande est un pays où il ne tonne, dit-on, jamais. Le capitaine Scoresby, dans ses nombreux voyages, n'a aperçu d'éclairs, au delà du 65e degré de latitude, que deux fois, et assure qu'on n'en a jamais vu au Spitzberg. Le capitaine Parry n'a vu aucun orage entre 81° 15′ et 82° 44′ de latitude.

Il paraît que dans les régions glaciales de l'hémisphère austral, il en est de même que vers le pôle nord, c'est-à-dire qu'il ne tonne pas; on ne doit pas cependant dire qu'il n'y ait jamais aucun orage, car on a fait observer que Cook a entendu le tonnerre le 23 février 1773, étant par 61° 52′ de latitude S., et 93° long. E. Il faut encore remarquer que plusieurs hommes de l'équipage de l'amiral Anson furent grièvement blessés par la foudre à bord du *Centurion*, étant au large et à l'ouest du détroit de Magellan; mais, d'après M. Duperrey, l'on peut déduire des voyages de Cook, de Bellingshausen et de celui de l'*Uranie*, qu'il ne tonne pas sur le parallèle du cap Horn au milieu du grand océan Austral, où se trouve le point le plus éloigné de toute terre; ce point est à environ 560 lieues de l'île O-Paro, de l'île Antipode, de l'île de Pâques, des îles de Pierre Ier et d'Alexandre Ier.

Nous sommes amenés naturellement à examiner cette question : Tonne-t-il autant en pleine mer qu'au milieu des continents?

M. Arago, en supputant un grand nombre d'observations, a été conduit à ce résultat, qu'il tonne moins en pleine mer qu'au centre des continents; il conjecture même qu'au delà d'une certaine distance de toute terre il ne tonne jamais. Dans la relation du voyage de Bougainville, on trouve des documents à l'appui de la diminution des orages en mer. Il semblerait résulter de là que l'*atmosphère océanique* est moins apte à engendrer des orages que celle des continents et des îles.

M. le capitaine Duperrey n'est pas aussi explicite sur la plus grande fréquence des orages sur terre que sur

mer. Tout étant porté à admettre cette diminution des orages en mer, et l'existence de lieux à de certaines distances des îles et des continents où il ne tonne jamais, il trouve de nombreuses anomalies :

« Un navigateur, dit-il (Becquerel, *Traité d'électricité*, « t. VI, p. 405), qui part des îles Moluques ou des îles « de la Sonde, où le tonnerre se fait entendre pour « ainsi dire tous les jours de l'année, doit naturellement « se trouver fort à son aise dès qu'il s'éloigne de ces îles « assourdissantes; mais un habitant de Lima, qui aurait « eu la fantaisie de nous accompagner jusqu'aux îles de « la Société, aurait éprouvé une impression toute con« traire; car il aurait entendu pour la première fois de « sa vie, éclater la foudre pendant trois jours consécu« tifs, alors que nous étions à 600 lieues du Pérou, à « 600 lieues à l'est de Taïti et à près de 230 lieues de la « petite île de Pâques. »

M. Duperrey « a la presque certitude qu'il ne tonne « que bien rarement sur la route directe du cap de Bonne« Espérance aux îles Sainte-Hélène et de l'Ascension. « Mais il n'en est pas de même à l'égard des autres par« ties de l'océan Atlantique, du Grand-Océan et de la mer « des Indes, comprises dans les régions tempérées. Il « tonne à 240 lieues dans l'est des côtes du Brésil et « de la Patagonie; il tonne sous la ligne équinoxiale, « entre l'Afrique et l'Amérique. Le point le plus isolé « dans l'océan Atlantique boréal est par 25° nord et « 46° ouest; il est à 380 lieues des Antilles, de la Guyane « des îles du cap Vert, des Açores et des Bermudes : il « y tonne. Le foudre et les éclairs se manifestent éga« lement à 200 et 240 lieues au sud du cap de Bonne« Espérance, de la Nouvelle-Hollande, de la Nouvelle« Zélande et de l'île de Pâques. Et si nous consultons « les voyages de la Pérouse, de Dixon, de Méars et de « M. Freycinet, nous retrouvons les mêmes phénomènes « non moins brillants que partout ailleurs, non-seule« ment à près de 250 lieues au nord-est des îles Ma« riannes, comme à plus de 300 lieues au nord des îles

« Sandwich, mais encore par 40° latitude nord et 180° « de longitude, précisément dans la partie centrale du « grand océan Boréal, où l'on se trouve à toute distance « du Japon, des îles Aleutiennes et de la côte nord-ouest « de l'Amérique septentrionale. Nous disons à toute dis- « tance, parce qu'il n'existe pas sur le globe, en y com- « prenant même les régions glaciales, un seul point de la « surface de la mer qui soit à plus de 600 lieues de toute « terre, et que les lieux, dont nous venons de parler, sur « lesquels les navigateurs semblent s'être donné le mot « pour y voir briller la foudre, sont à peu près à cette « distance des grandes terres environnantes. »

M. Duperrey conclut de ses recherches qu'il existe en plein Océan des parages où il ne tonne jamais, quelle que soit leur distance de la terre.

Quant à la question de savoir s'il en est des régions tempérées comme de la zone torride, où les orages sont presque toujours d'autant moins fréquents que l'on s'éloigne davantage des terres, nous croyons, comme M. Duperrey, que cette question est difficile à résoudre, non-seulement à cause du trop petit nombre de voyageurs que l'on peut consulter, mais encore en raison du hasard qui ferait que chaque navigateur se serait trouvé à point nommé en une région quelconque de la mer, l'un des vingt jours de l'année, terme moyen des jours de tonnerre observés dans les continents.

Pour que le lecteur puisse suivre la marche des orages de l'équateur aux régions polaires, nous donnons ici, d'après M. Arago (*Annuaire du Bureau des longitudes*, 1838, p. 405), une table dans laquelle les villes sont classées d'après le nombre moyen de coups de tonnerre entendus et non d'après les latitudes géographiques. Cette table n'étant point encore assez complète, M. Arago n'a point soumis tous les chiffres à une discussion minutieuse; on peut néanmoins reconnaître, sans dépasser la zone tempérée, que les mois pendant lesquels le tonnerre se fait entendre dans certains lieux sont ceux où il tonne le moins dans d'autres.

CALCUTTA (lat. 22° 1/2 N.; longit. 86° E.)........................... 60

Une seule année d'observations, l'année 1785.

RÉPARTITION DES 60 JOURS DE TONNERRE.

Janvier........	0	Février.........	4	Mars..........	6
Avril..........	5	Mai...........	7	Juin..........	8
Juillet........	6	Août..........	10	Septembre.....	9
Octobre........	5	Novembre......	0	Décembre.....	0

—

PATNA (dans l'Inde) (latit. 25° 37′ N.)............................. 53

Une seule année d'observations de M. Lind.

Ces 53 jours de tonnerre ont été renfermés entre mai et décembre inclusivement.

—

RIO-JANEIRO (latit. 23° S.; longit. 45° 1/2 O.)..................... 50,7

6 années d'observations de M. Dorta (de 1782 à 1787).

Extrêmes... 38 en 1786 et 77 en 1782.

RÉPARTITION PAR MOIS DE CES 50,7 ORAGES ANNUELS.

Janvier......	10,2	Février.........	9,3	Mars......	4,0
Avril.......	1,7	Mai...........	0,8	Juin.......	0,7
Juillet......	1,3	Août..........	1,1	Septembre.	2,8
Octobre	3,7	Novembre......	6,0	Décembre..	9,0

—

MARYLAND (États-Unis) (latit. 39° N.; longit. 79° O.)............. 41

Une seule année d'observations de M. Richard Brooke.

Janvier........	0	Février.........	0	Mars.........	5
Avril..........	1	Mai............	10	Juin.........	8
Juillet........	11	Août..........	5	Septembre....	0
Octobre......	1	Novembre.......	0	Décembre.....	0

—

ILE DE LA MARTINIQUE (latit. 14° 1/2 N.; longit. 63° 1/2 O.)...... 39

Il ne tonne jamais à la Martinique pendant les mois de janvier, février, mars et décembre. C'est en septembre qu'il tonne le plus souvent.

—

ABYSSINIE (latit. 13° N.; longit. 35° E.)........................... 38

Une seule année d'observations de Bruce (1770).

RÉPARTITION PAR MOIS.

Janvier......	0,0	Février.......	0,0	Mars........	4,0
Avril......	4,0	Mai..........	6,0	Juin........	7,0
Juillet.....	3,0	Août.........	6,0	Septembre...	4,0
Octobre....	4,0	Novembre....	0,0	Décembre...	0,0

ILE DE LA GUADELOUPE (latit. 16° 1/3 N.; longit. 64° O.)......... 37

Il ne tonne jamais dans cette île pendant les mois de janvier, février, mars et décembre. Le mois de septembre est celui pendant lequel il tonne le plus souvent.

VIVIERS (Ardèche) (latit. 47° 1/2 N.; longit. 2° 1/3 E.)............... 24,7

10 années, de 1807 à 1816.

Extrêmes.................... 14 en 1814, 35 en 1811.

RÉPARTITION PAR MOIS DES 24,7 ORAGES ANNUELS.

Janvier......	0,0	Février......	0,1	Mars.........	0,6
Avril........	2,2	Mai..........	4,0	Juin.........	3,4
Juillet......	5,1	Août.........	3,4	Septembre...	3,1
Octobre.....	2,2	Novembre...	0,6	Decembre...	0,0

QUÉBEC (Canada) (latit. 46° 3/4 N.; longit. 73° 1/2 O.).............. 23,3

RÉPARTITION DANS LES DIFFÉRENTS MOIS DES 23,3 JOURS DE TONNERRE.

Janvier......	0,0	Février......	0,0	Mars.........	0,0
Avril........	0,6	Mai..........	2,5	Juin.........	5,5
Juillet......	8,0	Août.........	5,0	Septembre...	1,0
Octobre.....	0,5	Novembre...	0,1	Décembre....	0,1

BUENOS-AYRES (latit. 34° 1/2 S.; longit. 60° 3/4 O.)................. 22,6

7 années d'observations de M. Mossotti.

RÉPARTITION SUIVANT LES MOIS.

Janvier......	1,9	Février......	2,6	Mars.........	2,1
Avril........	1,8	Mai..........	1,7	Juin.........	1,1
Juillet......	1,3	Août.........	1,0	Septembre...	2,9
Octobre.....	2,3	Novembre...	1,8	Décembre...	2,0

DENAINVILLIERS, près Pithiviers (Loiret); (latit. 48° N.; longit. 0° »). 20,6

24 années d'observations de Duhamel (entre 1755 et 1780).

Extrêmes... 15 en 1765, 32 en 1769.

RÉPARTITION PAR MOIS DE 20,6 JOURS DE TONNERRE.

Janvier......	0,1	Février......	0,1	Mars.........	0,5
Avril........	1,6	Mai..........	3,6	Juin.........	4,5
Juillet......	4,4	Août.........	3,5	Septembre...	1,5
Octobre.....	0,5	Novembre...	0,3	Décembre...	0,0

SMYRNE (latit. 38° 1/2 N.; longit. 24° 3/4 E.)........................ 19

Une seule année d'observations de M. de Nerciat.

RÉPARTITION DANS LES DIFFÉRENTS MOIS.

Janvier......	2,0	Février......	4,0	Mars.........	4,0
Avril........	1,0	Mai..........	1,0	Juin.........	0,0
Juillet......	0,0	Août.........	0,0	Septembre...	3,0
Octobre.....	0,0	Novembre...	1,0	Décembre...	3,0

BERLIN (latit. 52° 1/2 N.; longit. 11° E.)........................ 18,4

15 années d'observations de Béguelin, de 1770 à 1785.

Extrêmes..... 11 en 1780, 30 en 1783.

RÉPARTITION PAR MOIS DES 18,4 ORAGES ANNUELS.

Janvier.....	0,0	Février.....	0,0	Mars........	0,1
Avril.......	0,6	Mai........	2,6	Juin........	3,9
Juillet......	4,2	Août........	5,3	Septembre...	1,3
Octobre.....	0,1	Novembre...	0,1	Décembre...	0,1

PADOUE (latit. 45° 1/3 N.; longit. 9° 1/2 E.)...................... 17,5

4 années d'observations, de 1780 à 1783.

RÉPARTITION PAR MOIS DE CES 17,5 JOURS DE TONNERRE.

Janvier......	0,0	Février......	0,0	Mars........	1,2
Avril.......	2,2	Mai.........	1,2	Juin........	3,5
Juillet......	3,5	Août........	2,5	Septembre...	0,7
Octobre.....	1,0	Novembre...	1,5	Décembre...	0,0

STRASBOURG (latit. 48° 1/2 N.; longit. 5o° 1/2 E.)................ 17

20 années d'observations de M. Kerrenschneider.

Extrêmes..................... 6 en 1818, 21 en 1831.

MAESTRICHT (latit. 51° N.; longit. 3° 1/3 E.)...................... 16,2

11 années d'observations de M. Crahay.

Extrêmes................. 8 en 1823, 27 en 1826.

RÉPARTITION PAR MOIS.

Janvier......	0,0	Février.....	0,1	Mars........	0,4
Avril........	1,5	Mai.........	2,5	Juin.........	2,9
Juillet......	3,7	Août........	3,3	Septembre...	1,4
Octobre.....	0,5	Novembre...	0,1	Décembre...	0,1

LACHAPELLE (près de Dieppe) (latit. 50° N.; longit. 1° 1/4 E.)....... 15,7

18 années d'observations faites, sous l'inspection de M. Nell de Bréauté, par M. Racine.

Extrêmes..... 6 en 1820, 23 en 1828.

RÉPARTITION PAR MOIS DE CES 16 ORAGES ANNUELS.

Janvier......	0,2	Février.....	0,2	Mars........	0,5
Avril.......	1,1	Mai.........	2,6	Juin........	3,2
Juillet......	2,3	Août........	1,8	Septembre...	1,3
Octobre.....	0,7	Novembre...	0,8	Décembre...	1,0

TOULOUSE (latit. 43° 1/2 N.; longit. 1° O.)......................... 15,4

7 années d'observations, de 1784 à 1790.

Extrêmes........................ 4 en 1784, 24 en 1788.

UTRECHT (Hollande) (latit. 52° N.; longit. 2° 3/4 E.)............... 15

Un grand nombre d'années d'observations citées par Muschenbroeck.

Extrêmes... 5 en 1740, 23 en 1737.

—

TUBINGUE (latit. 48° 1/2 N.; longit. 6° 3/4 E.)..................... 14,6

9 années d'observations de Kraaft.

—

PARIS (lat. 48° 50′ N.; longit. 0° »)................................ 12,2

12 années, de 1785 à 1803.

Extrêmes.................. 7 en 1796, 22 en 1794.

RÉPARTITION SUIVANT LES MOIS.

Janvier.......	0,1	Février.......	0,1	Mars..........	0,2
Avril.........	0,8	Mai...........	1,8	Juin..........	3,0
Juillet.......	2,5	Août..........	2,2	Septembre.....	0,7
Octobre.......	0,6	Novembre......	0,1	Décembre......	0,1

—

10 années, de 1806 à 1815... 14,9

Extrêmes........... 8 en 1815, 25 en 1811.

Janvier.......	0,0	Février.......	0,3	Mars..........	0,1
Avril.........	0,5	Mai...........	3,2	Juin..........	3,1
Juillet.......	2,7	Août..........	2,4	Septembre.....	1,5
Octobre.......	0,7	Novembre......	0,1	Décembre......	0,3

—

De 1816 à 1825... 13,2

Extrêmes..... 6 en 1823, 22 en 1822.

Janvier.......	0,1	Février.......	0,0	Mars..........	0,5
Avril.........	1,0	Mai...........	3,0	Juin..........	2,8
Juillet.......	2,1	Août..........	1,5	Septembre.....	1,6
Octobre.......	0,3	Novembre......	0,2	Décembre......	0,1

—

De 1826 à 1837... 14,7

Extrêmes...... 8 en 1831, 20 en 1837.

Janvier.......	0,0	Février.......	0,1	Mars..........	0,3
Avril.........	0,9	Mai...........	3,1	Juin..........	2,9
Juillet.......	3,2	Août..........	2,2	Septembre.....	1,2
Octobre.......	0,6	Novembre......	0,0	Décembre......	0,1

—

MOYENNES DES QUATRE PÉRIODES.

De 1785 à 1837... 13,8

Janvier.......	0,1	Février.......	0,1	Mars..........	0,3
Avril.........	0,8	Mai...........	2,7	Juin..........	2,9
Juillet.......	2,6	Août..........	2,1	Septembre.....	1,3
Octobre.......	0,5	Novembre......	0,1	Décembre......	0,1

LEYDE (Hollande) (latit. 52° N.; longit. 2° E.)........................ 13,5

29 années d'observations de Muschenbroeck.

Extrêmes.................... 5 en ...., 17 en 1748.

RÉPARTITION PAR MOIS DES 13,5 JOURS ANNUELS DE TONNERRE.

Janvier......	0,1	Février......	0,4	Mars........	0,2
Avril........	0,3	Mai.........	2,1	Juin........	2,7
Juillet......	2,9	Août........	2,9	Septembre...	1,0
Octobre.....	0,3	Novembre...	0,3	Décembre...	0,2

ATHÈNES (latit. 38° N.; longit. 21° 1/3 E.)........................ 11

3 années, de 1833 à 1835.

Extrêmes................. 7 en 1835, 18 en 1834.

POLPERO (côte orient. du Cornouailles) (lat. 50° 1/3 N.; long. 6° 1/2 O). 10

13 années d'observations de M. Jonathan Couch.

PÉTERSBOURG (latit. 60° N.; long. 28° E.)........................ 9,2

11 années d'observations de Kraafft (depuis 1726 jusqu'en 1736).

RÉPARTITION PAR MOIS DE CES ORAGES ANNUELS.

Janvier......	0,0	Février......	0,0	Mars........	0,0
Avril........	0,7	Mai.........	2,7	Juin........	2,1
Juillet......	2,5	Août........	0,9	Septembre...	0,1
Octobre.....	0,0	Novembre...	0,1	Décembre...	0,0

LONDRES (latit. 51° 1/2 N.; longit. 2° 1/2 O.)........................ 8,5

13 années d'observations de M. Howard, de 1807 à 1822, faites à Plaistow, à Clapton et à Tottenham, près de Londres.

Extrêmes... 5 en 1819, 13 en 1809.

RÉPARTITION PAR MOIS DES 8,5 ORAGES ANNUELS.

Janvier......	0,0	Février......	0,2	Mars........	0,4
Avril........	0,4	Mai.........	1,8	Juin........	1,4
Juillet......	2,0	Août........	1,3	Septembre...	0,4
Octobre.....	0,4	Novembre...	0,2	Décembre...	0,1

PÉKIN (latit. 40° N.; longit. 114° E.)........................ 5,8

6 années d'observations des missionnaires, de 1757 à 1762.

Extrêmes..... 3 en 1757, 14 en 1762.

RÉPARTITION PAR MOIS DES 5,8 ORAGES ANNUELS.

Janvier......	0,0	Février......	0,0	Mars........	0,0
Avril........	0,2	Mai.........	0,5	Juin........	2,0
Juillet......	1,7	Août........	1,0	Septembre...	0,3
Octobre.....	0,1	Novembre...	0,0	Décembre...	0,0

LE CAIRE (Égypte) (latit. 30° N.; longit. 29° E.)................ 3,5

2 années d'observations de M. le docteur Destouches (1835 et 1836).

Extrêmes..... 3 en 1836, 4 en 1835.

RÉPARTITION DES 3,5 JOURS D'ORAGES ANNUELS.

Janvier......	1,0	Février......	0,0	Mars........	0,5
Avril........	1,0	Mai..........	0,0	Juin........	0,0
Juillet	0,0	Août.........	0,0	Septembre. .	0,0
Octobre......	0,0	Novembre...	0,5	Décembre...	0,5

Ainsi, en général, le nombre des orages diminue de l'équateur aux pôles comme la quantité de pluie, et devient également moindre en s'éloignant des continents à latitude égale; mais en particulier, les anomalies ne sont pas moins nombreuses que celles que présentent les pluies.

Lignes de partage des orages. — Dans l'intérieur d'un même pays, la distribution des orages est fort inégale; les nuages orageux suivent de préférence certaines directions, et il se forme quelquefois des lignes de partage, c'est-à-dire que souvent une montagne et même une colline suffit pour dévier un orage, et qu'un sommet isolé peut le partager. Cet effet paraît se rapporter uniquement aux obstacles mécaniques opposés par les inégalités du sol : on a vu, en effet, dans le paragraphe précédent, que des courants d'air froid sont dirigés du nuage vers le sol et accompagnent l'orage; alors, si ces courants d'air rencontrent un obstacle, ils le contournent, et en réagissant sur le nuage orageux, ils peuvent changer sa marche. C'est ainsi que l'on conçoit que certaines localités peuvent être en partie préservées des orages.

SECTION III.

DES EFFETS DE LA FOUDRE.

§ I. — *Des éclairs et du bruit du tonnerre.*

Lueurs électriques.— La réunion des deux électricités entre les nuages orageux et la terre ne s'effectue pas toujours par des décharges donnant lieu aux effets de la

foudre : souvent cette réunion s'opère lentement par l'intermédiaire des corps placés à la surface du sol, et se manifeste par des aigrettes et des lueurs plus ou moins vives, principalement aux extrémités des corps terminés en pointe. Ces effets ont été observés de tout temps; quelquefois ces lueurs apparaissent sur la tête des individus, à l'extrémité des objets qu'ils portent à la main, etc. Parmi la multitude de faits que nous pourrions citer à l'appui de ce qui précède, nous nous bornerons à rapporter l'exemple suivant : De Saussure, en 1781, se trouvait sur la cime du Brêven avec Jallabert et Pictet; chaque fois qu'il élevait la main, il ressentait autour des doigts une espèce de frémissement semblable à celui que l'on éprouve lorsqu'on s'approche d'un conducteur d'une machine électrique. Bientôt après on tira des étincelles d'un bouton d'or fixé à son chapeau. L'orage grondait alors dans un nuage situé au-dessus de sa tête. Une pluie étant survenue, tous les signes d'électricité disparurent.

Ces feux électriques sont plus fréquents en mer, à l'extrémité des mâts et des vergues, que sur terre, parce que l'électricité n'a pas d'autre conducteur pour se rendre dans l'eau. Ils y sont connus depuis un temps immémorial sous les noms de feux Saint-Elme, Castor et Pollux, etc. Dans de très-fortes tempêtes, on en a vu quelquefois sous la forme de langues de feu, qui faisaient entendre de petites détonations.

On a des exemples de pluies étincelantes, de neige et de grêle lumineuses; ces effets sont dus à ce que les particules aqueuses viennent de régions fortement électrisées.

On a prétendu que des nuages orageux peuvent être lumineux d'une manière continue. Dans l'incertitude où l'on est à cet égard, nous nous bornerons à citer une observation de Roziers, ayant rapport à ce sujet : le 15 août 1781, après le coucher du soleil, le ciel, à Béziers, se couvrit de nuages; à 7h 3/4 le tonnerre commença à se faire entendre; à 8h 5′, il faisait complétement nuit, et l'orage avait acquis une très-grande intensité : « C'est à ce moment, dit Roziers, qu'en exa-

« minant la direction et l'effet des éclairs, j'aperçus « derrière le penchant de la colline qui, d'un côté, ter- « mine la vue de ma maison, un point lumineux..... « Ce point lumineux ayant acquis peu à peu du volume « et de l'étendue, il forma insensiblement une zone, « une bande phosphorique, qui se montrait à mes yeux « sur une hauteur d'un mètre; elle finit par sous-tendre « à mon œil un angle de 60°. Sur cette première zone « lumineuse, il s'en forma une seconde de la même « hauteur, mais qui n'avait que 30° d'étendue..., c'est-à- « dire la moitié de celle de la zone inférieure. Entre deux « resta un vide dont la hauteur égalait celle d'une des « deux zones prises séparément. On remarquait dans « l'une comme dans l'autre zone des irrégularités à peu « près comme sur les bords des gros nuages blancs, « avant-coureurs de l'orage. Ces bords n'étaient pas « tous également lumineux, quoique le centre des zones « offrît une clarté lumineuse. Pendant le temps que les « zones avançaient vers l'est....., la foudre, à trois re- « prises différentes, s'élança de l'extrémité de la zone « inférieure, mais sans produire de détonation appré- « ciable. »

Ne voulant pas préjuger la question et admettre sans nouvel examen que la haute tension électrique des nuages peut les rendre lumineux, nous nous demandons si plusieurs phénomènes météoriques n'ont pas existé simultanément, et si les effets ne se sont peut-être pas compliqués de ceux de l'aurore boréale?

On ne sait si les brouillards tels que celui de 1783, que l'on prétend avoir été lumineux, doivent leur lumière à une action électrique. Il ne faut pas ranger dans les effets dus à l'électricité les lueurs que l'on observe près des endroits marécageux et des cimetières, et qui sont produites par des décompositions ou des combinaisons chimiques.

Des éclairs. — L'éclair qui sillonne l'espace compris entre deux nuées n'a qu'une durée inappréciable, puisque la vitesse de l'électricité est excessive; en outre, le son

parcourant 340 mètres par seconde, il doit s'écouler entre l'apparition de l'éclair et la détonation, autant de secondes qu'il y a de fois 340 mètres entre le lieu où l'on est et celui où éclate la foudre. La durée de ce temps est très-variable, puisqu'elle est proportionnelle à la distance de l'observateur à l'éclair; De L'isle a compté une fois 672 secondes entre l'éclair et le tonnerre : c'est l'intervalle le plus long dont fassent mention les recueils météorologiques ; ce nombre donne pour la distance du nuage où l'éclair s'était montré, 24264 mètres ou 6 lieues.

Quand l'éclair brille sans être suivi d'un coup de tonnerre, on est assuré que le lieu où s'opère la décharge est situé à une distance telle de l'observateur que le son est inappréciable.

Les éclairs dits de chaleur, parce qu'ils brillent dans les belles nuits d'été, ne sont probablement que la réverbération, sur des couches atmosphériques plus ou moins élevées, d'éclairs ordinaires produits dans des nuages orageux que l'on ne peut apercevoir, à cause de la forme arrondie de la terre. Ces éclairs silencieux étant engendrés au milieu de nuages situés à de très-grandes distances de l'observateur, le bruit des détonations et du roulement du tonnerre ne peut parvenir jusqu'à lui.

M. Duperrey a cité, dans les tableaux de routes de la corvette *la Coquille*, qu'il a publiés en 1829, un exemple de la distance extraordinaire à laquelle on peut apercevoir la lueur des éclairs :

« Dans la soirée du 6 mars 1823, étant entre les pa-
« rallèles de Lima et de Truxillo, environ 30 lieues dans
« l'ouest de la côte, nous vîmes des éclairs très-brillants
« dans l'est et le nord-est, au terme de l'horizon; le vent
« était au sud-sud-est, le temps magnifique, et le ciel
« d'une pureté remarquable. Le tonnerre ne se fit point
« entendre. L'on sait en effet, depuis longtemps, qu'il ne
« tonne jamais sur les côtes du bas Pérou; mais l'on sait
« aussi, d'après don Antonio de Ulloa, qu'il n'en est pas

« ainsi à 30 lieues dans l'intérieur de cette contrée. Il « est donc permis d'admettre que les éclairs dont nous « avons vu la lueur, dans notre atmosphère de *la Coquille*, « avaient pris naissance au milieu des nuages orageux « situés à 60 lieues de distance. »

L'éclair suit toujours une ligne courbe ou brisée, effet dû à la propriété que possède l'électricité de suivre toujours la ligne qui offre le moins de résistance à sa transmission; dans les fortes décharges, l'air étant plus ou moins comprimé, l'électricité cherche la partie où l'air est le moins condensé; elle se dévie alors de la ligne droite pour suivre une ligne brisée ou courbe dont on ne peut prévoir la forme.

Bien que la plupart du temps l'électricité se porte à la surface des nuages denses, on ne doit pas néanmoins considérer ceux-ci comme des conducteurs parfaits, en raison des intervalles qui séparent toujours les globules vésiculaires, même quand ils sont très-rapprochés: il résulte de là que souvent le même nuage, à différentes reprises, donne naissance à plusieurs étincelles successives.

On a remarqué que l'éclair parcourt souvent des distances de plusieurs lieues; cet effet pourrait provenir, indépendamment de l'action par influence, de la présence de nuages isolés ou de la présence de globules vésiculaires servant d'intermédiaires pour opérer la décharge.

La plupart du temps les éclairs sont blancs, mais quelques météorologistes prétendent en avoir observé de couleur purpurine violacée, semblable à celle que présente la lumière électrique dans le vide.

La réunion des électricités ne se fait pas en général en donnant toujours lieu à des éclairs de même forme; il peut se présenter trois apparences principales d'après lesquelles on a établi trois classes d'éclairs.

Les éclairs qui composent la première classe, ont la forme d'un sillon de lumière, mince, serré, très-arrêté sur ses bords, se mouvant en zig-zag et pouvant se bifurquer ou se diviser en plusieurs branches; quelquefois,

après plusieurs zigzags, ils retournent vers la région d'où ils sont partis. Ces éclairs peuvent être comparés aux étincelles qu'on tire du conducteur d'une machine électrique ordinaire.

Les éclairs de la deuxième classe comprennent ceux dont la lumière, au lieu d'être concentrée en un trait lumineux, occupe un espace considérable; suivant une expression vulgaire, les nues, lors de leur apparition, semblent s'entr'ouvrir. La décharge électrique, dans cette circonstance, paraît avoir lieu à l'intérieur des nuages et en éclairer la masse. Ces éclairs, qui sont les plus communs, pourraient être comparés à l'étincelle brillante, large et peu longue qui résulte de la décharge d'une batterie électrique dans laquelle l'électricité est fortement condensée. La teinte de ces éclairs est souvent d'un rouge très-intense, mêlé quelquefois de blanc ou de violet.

Dans la troisième classe se trouvent des éclairs qui diffèrent des précédents sous le rapport de la vitesse et de la durée. Ils sont visibles pendant 1, 2, et même 10 secondes, de sorte qu'ils peuvent se transporter des nuages vers la terre pendant un temps assez appréciable pour que l'on puisse suivre de l'œil leur mouvement. Leur forme approche de celle d'une sphère; ce sont de véritables globes de feu qui se divisent parfois, et rebondissent sur la terre à plusieurs reprises; ils ont des mouvements tantôt longs, tantôt rapides et quelquefois, en éclatant, ils font entendre un bruit comparable à la détonation de plusieurs pièces de canon. Il est à remarquer que la foudre se présente en général sous cette apparence quand elle pénètre dans l'intérieur des édifices. (Arago, *Annuaire du Bureau des longitudes*, 1838, p. 259 et suivantes.)

On ne sait rien sur l'origine de ces globes; jusqu'ici on n'a pu donner une explication satisfaisante de leur formation. Les nuages électrisés pouvant être positifs ou négatifs, il pourrait se faire que l'espèce d'électricité ne fût pas indifférente aux apparences diverses qui se manifestent dans ces circonstances, et alors, peut-être

pourrait-on en tirer quelques déductions importantes sur la nature de l'agent mystérieux qui produit les orages; mais les observations manquent et l'on ne pourrait faire que des conjectures qui ne seraient appuyées d'aucune preuve. Peut-être aussi est-ce dans la différence des électricités qu'il faut chercher l'explication des foudres ascendantes et descendantes, ou des décharges partant de terre ou des nuages. Cette question est fort complexe et le défaut de données à cet égard ne permet pas d'y répondre.

Du bruit du tonnerre. — Le bruit du tonnerre et le roulement qui l'accompagne sont la conséquence d'une décharge analogue à celle de la bouteille de Leyde. Ce roulement, ce retentissement du tonnerre au loin provient de ce que l'air a été ébranlé plus ou moins fortement par l'électricité; il en résulte un déplacement dans les parties les plus voisines du nuage, et conséquemment une suite de condensations et de dilatations qui, se propageant au loin, produisent des retentissements longtemps prolongés.

Avec le thermomètre de Kinnersley, on met bien en évidence cette propriété du fluide électrique, en traversant l'air, de refouler les particules qu'il rencontre, et d'y produire un vide momentané, dans lequel se précipite immédiatement après l'air environnant.

M. Pouillet pense que ce fait ne suffit pas pour expliquer le roulement du tonnerre. Suivant lui, si telle était la cause du retentissement du tonnerre, le passage d'un boulet de canon dans l'air devrait produire un effet semblable; ce qui n'est pas, puisqu'il ne fait entendre qu'un sifflement. M. Pouillet pose en principe que l'électricité ne pouvant éclater entre deux corps qu'autant qu'il y a décomposition et recomposition d'électricité entre toutes les parties qu'elle traverse, il doit en résulter des vibrations plus ou moins violentes dans la matière pondérable. Le bruit serait donc le résultat de ces vibrations qui se propageraient dans toute la masse environnante. Si l'on considère maintenant un éclair d'une

longueur de quelques mille mètres, la lumière devra briller successivement, quoiqu'à des intervalles excessivement rapprochés, entre tous les espaces qui séparent les molécules aériennes : en outre, l'ébranlement se produira en même temps que l'éclair; mais, comme le son n'a qu'une vitesse de 340 mètres environ par seconde, tandis que celle de la lumière est excessive, il s'ensuit que, si un observateur se trouve sur la ligne de l'éclair à une distance de 340 mètres, il y aura d'abord un éclat de lumière, puis silence absolu pendant une seconde; immédiatement après, le bruit commencera à lui parvenir : d'abord celui qui est produit par la vibration excitée dans la couche la plus voisine de lui, et ensuite successivement, sans interruption, le bruit des autres couches, jusqu'à celui qui provient des dernières couches ébranlées.

L'exemple du canon ne nous paraît pas concluant, car les circonstances ne sont pas les mêmes dans les deux cas : la vitesse du boulet est appréciable, tandis que celle de l'électricité ne l'est pas; dès lors, le refoulement de l'air dans la décharge électrique doit être infiniment plus considérable que dans le passage du boulet, et rien ne s'oppose à ce que, dans le cas de l'électricité, les condensations et dilatations successives ne produisent des détonations avec retentissement.

En adoptant l'explication que nous venons de donner, on se demande quelle est l'origine des longs roulements qui distinguent le bruit du tonnerre et auxquels on a donné le nom d'éclats; M. Arago, qui a examiné cette question, a cherché jusqu'à quel point les échos pouvaient être considérés comme causes productrices du phénomène. On a vu que le roulement du tonnerre pouvait durer 45 secondes, et même au delà : existe-t-il des exemples d'échos pouvant donner lieu à d'aussi longs roulements? Scoresby en cite un près des lacs de Kilarney; il a entendu le bruit de la décharge d'un pistolet pendant une demi-minute.

A la vérité, les marins assurent qu'on entend également le roulement de la foudre en pleine mer, là où il

n'existe aucun objet terrestre capable de réfléchir le son. Mais en faisant cette objection, on admet donc que les nuages ne jouissent pas de la même propriété; cependant Muschenbroeck avance avoir observé que dans une localité où la décharge du canon ne fait entendre qu'un seul coup quand le ciel est serein, le bruit se répète plusieurs fois si le temps est couvert; cette observation a été faite aussi dans les expériences sur la vitesse du son, qui ont eu lieu entre Villejuif et Montlhéry.

Le docteur Robert Hooke a établi une distinction entre les éclairs simples et les éclairs composés ou multiples. Chacun des premiers n'occupe qu'un point dans l'espace et produit un bruit court et instantané; le bruit des autres, au contraire, est un roulement prolongé, attendu que les différentes parties des longues lignes que ces éclairs occupent, se trouvant en général à des distances diverses, les sons qui s'y engendrent, soit successivement, soit au même instant physique, doivent employer des temps graduellement inégaux pour venir frapper l'oreille de l'observateur. On voit par là l'étroite liaison qui existe entre les éclats du tonnerre et les zigzags des éclairs; cette circonstance, jointe aux effets des échos, rend compte des roulements prolongés de la foudre.

§ II. — *Des effets qui accompagnent la foudre.*

Action par influence; choc en retour. — Toutes les fois qu'un nuage est fortement chargé d'électricité, et qu'une personne se trouve dans sa sphère d'activité, l'électricité naturelle de cette personne est décomposée par influence; celle de nom contraire à l'électricité du nuage est attirée, et l'électricité de même nom est repoussée dans le sol; la personne se trouve donc dans un état électrique contraire à celui du nuage. Mais si le nuage vient à se décharger en un point quelconque, même à une assez grande distance, alors, perdant tout à coup une portion de son électricité, il ne peut plus maintenir

dans un état électrique contraire la personne qui est située au-dessous de lui; celle-ci perd donc tout à coup son électricité par influence. L'énergie de la secousse est en rapport avec la charge de nuage : elle peut être assez forte pour donner la mort. Dans ce cas, la personne est foudroyée par le *choc en retour*.

L'exemple le plus remarquable que l'on puisse citer à cette occasion, est l'observation du fait dont Bridone nous a conservé le souvenir. Le 19 juillet 1785, entre midi et une heure, il éclata un orage dans le voisinage de Cold-stream, qui produisit les effets suivants : Une femme qui coupait du foin près des rives de la Tweed tomba à la renverse; elle appela sur-le-champ ses compagnons, et leur dit qu'elle venait de recevoir sous son pied, et sans pouvoir dire de quelle manière, le coup le plus violent. En ce moment, il n'y avait dans le ciel ni éclairs ni tonnerre. Le berger de la ferme de Lennel-Hill vit tomber, à quelques pas de lui, un mouton qui, peu de moments auparavant, paraissait en parfaite santé; il courut pour le relever, mais il le trouva roide mort; l'orage paraissait alors être très-éloigné. Deux tombereaux chargés de terre étaient conduits par un jeune cocher, assis en avant sur un petit siége; ils venaient, l'un et l'autre, de traverser la Tweed, ils achevaient de gravir une montée voisine des bords de cette rivière, lorsqu'on entendit à la ronde une forte détonation, semblable à celle qui serait résultée de la décharge à peu près simultanée de plusieurs fusils, mais sans aucun roulement. Au même instant, le cocher du tombereau de derrière vit le tombereau de devant, les deux chevaux, et son camarade, tomber à terre. Le cocher et les chevaux étaient roides morts.

Effets chimiques. — Lorsque la foudre s'élance d'un nuage sur la terre, elle laisse souvent sur son passage de la fumée et presque toujours une forte odeur que l'on a comparée à celle du soufre enflammé ou d'une matière phosphoreuse. On sait aujourd'hui que cette odeur est due à un composé appelé *ozone*, qui se forme

dans l'air sous l'influence de la décharge électrique. Les recherches faites à cet égard ont prouvé que l'oxygène est indispensable à sa production, mais n'ont pu décider si l'ozone est un état particulier de l'oxygène ou une combinaison de ce gaz encore inconnue.

La foudre, en traversant l'air atmosphérique, détermine la combinaison de l'oxygène avec l'azote, comme Cavendish l'a prouvé, et d'où résulte de l'acide nitrique pouvant se combiner avec la chaux, l'ammoniaque et autres bases qui se trouvent en suspension dans l'air. Les combinaisons formées se retrouvent dans les eaux pluviales qui se déversent en temps d'orage.

On est dans l'habitude d'attribuer à la présence du fluide électrique dans l'air, pendant les orages, l'acescence du lait et la corruption des chairs, qui réellement sont plus promptes dans cette saison que dans une autre. On ne sait rien de pôsitif à cet égard; peut-être ces effets dépendent-ils de la température élevée de l'air dans la saison où ces phénomènes se manifestent.

Effets physiologiques. — Les hommes et les animaux sont tués par la foudre; quelquefois ils sont foudroyés sans être tués. Cet effet est facile à concevoir : les corps organisés étant de médiocres conducteurs, l'électricité peut glisser sur leur surface sans y pénétrer, surtout quand la surface n'est pas humide; quelquefois ils sont préservés de ses atteintes par un vêtement de soie qui l'empêche également d'exercer son action. Quand cela n'a pas lieu, la foudre détermine des lésions dans les organes, et en particulier dans le système vasculaire, lésions qui occasionnent instantanément la mort; en raison de ce désordre, la putréfaction s'y manifeste très-promptement.

A l'occasion de l'action physiologique de l'électricité, nous devons dire quelques mots de l'influence de l'électricité atmosphérique sur les animaux et les végétaux. Dans l'état habituel de l'atmosphère, lorsque le ciel est serein, la terre et l'atmosphère étant dans deux états électriques opposés, il s'opère continuellement une

réunion des électricités par l'intermédiaire des corps placés à la surface du sol; cette réunion intervient-elle dans les réactions chimiques qui s'opèrent dans les corps organisés? c'est ce que l'on ne saurait décider à cause de leur peu d'intensité. Mais si cette action est très-faible dans les temps sereins, en supposant qu'elle ait lieu, en est-il de même dans les temps d'orage lorsque la tension électrique est puissante et que des aigrettes s'observent à l'extrémité des corps conducteurs? Il peut se faire alors que l'électricité agisse, mais seulement en excitant le système nerveux des personnes impressionnables et nullement par des effets chimiques qui seraient inappréciables dans ces circonstances; il se produirait dans ce cas le même effet que lorsque certaines personnes sont soumises à des décharges de machines ordinaires; ce ne sont, du reste, que des conjectures, car il est possible que les malaises et autres effets que l'on peut ressentir en temps d'orage soient simplement dus à la haute température et aux conditions extérieures d'humidité qui, elles-mêmes, engendrent les nuages orageux.

Effets de chaleur et de fusion. — Quand la foudre tombe sur la terre, elle casse, brise, enflamme et fond les corps, selon qu'ils sont mauvais conducteurs, combustibles, métalliques, ou fusibles. Un des exemples les plus remarquables est ce coup de foudre qui fondit dans toute son étendue une chaîne de fer de 40 mètres de long, en communication avec la mer par l'une de ses extrémités, et dont le diamètre des divers chaînons n'excédait pas 6 millimètres.

Quand la foudre traverse des fils métalliques qu'elle ne peut fondre, elle les raccourcit comme le fait l'électricité ordinaire. Lorsqu'elle fond des métaux, elle laisse des traces de fusion du métal sur les murs, les bois contigus, et même sur le corps des personnes foudroyées qui portaient sur elles des pièces métalliques.

La foudre, en traversant les corps et comprimant l'air, dégage assez de chaleur pour enflammer rapidement les liqueurs alcooliques et les substances ténues,

telles que la paille, le foin, le coton; il paraît que c'est lorsque la foudre se présente sous la forme d'éclairs en boule que les effets d'inflammation sont fréquents.

Les bulles et couches vitreuses que les voyageurs ont observées sur les sommets des hautes montagnes, sont rapportés à des effets de fusion dus aux décharges électriques; on est d'autant plus porté à admettre cette explication que ces enduits sont semblables à ceux que l'on remarque sur les briques et les autres substances fusibles non conductrices frappées de la foudre.

Lorsque la foudre tombe sur un point quelconque de la surface de la terre, elle suit toujours les corps meilleurs conducteurs qui se présentent à elle pour se rendre dans l'intérieur; mais si, pour atteindre des nappes d'eau à une certaine profondeur au-dessous du sol, elle est obligée de traverser des masses plus ou moins considérables de sable ou de matières capables d'être fondues à une température élevée, il se produit alors, dans la direction de la décharge, des tubes vitrifiés, auxquels on a donné le nom de *tubes fulminaires*.

Les tubes fulminaires qu'on a observés dans les landes de Paderborn et dans d'autres localités sont creux et descendent dans le sable, suivant la verticale, jusqu'à des parties humides, où le fluide électrique qui les a formés a dû s'échapper dans toutes sortes de directions. On en a trouvé aussi dans des directions obliques. Leur longueur peut aller à 7 ou 10 mètres. Ils sont divisés souvent en fragments par de larges fissures transversales; quelquefois le tuyau principal se partage en plusieurs tubes latéraux; leur paroi intérieure est un verre uni très-brillant, très-pur, et leur enveloppe est formée d'une croûte de grains de sable agglutinés, dont la couleur varie avec la nature des couches que parcourt la foudre.

A Wrigg, les tubes fulminaires ont été formés au milieu de buttes de sable mouvant, de 13^{m},33 de hauteur, dans le voisinage de la mer; leur diamètre total est en moyenne de 67 millimètres.

L'expérience de MM. Savart, Hachette et Beudant ne laisse aucun doute sur l'origine des tubes fulminaires: en faisant passer la décharge d'une très-forte batterie à travers du verre pilé en poudre, ils ont obtenu des tubes de 25 millimètres de longueur, dont le diamètre extérieur, qui décroissait irrégulièrement d'une extrémité à l'autre, était de 2 à 3 millimètres, et le diamètre intérieur d'un millimètre.

Le fait suivant vient encore à l'appui de ce que nous venons de dire. Le 3 septembre 1789, le tonnerre foudroya, dans le parc du comte d'Aylesford, un homme qui avait cherché un abri sous un arbre. La matière électrique avait suivi le bâton que ce malheureux portait à la main et qui lui servait d'appui. Le sol, au point où aboutissait le bâton, était percé d'un trou de 135 millimètres de profondeur. En creusant, on trouva que le sol, dans la direction du trou, avait été noirci jusqu'à une profondeur de $0^m,27$; $0^m,054$ au-dessous, le terrain quartzeux offrait des traces évidentes de fusion.

Effets mécaniques, transport, etc. — Quand la foudre suit des corps conducteurs interrompus par des corps non-conducteurs, elle brise ces derniers pour reprendre sa route à travers les premiers; c'est ainsi qu'elle projette en l'air des pièces métalliques scellées dans des murs. Il faut remarquer que c'est en général à l'entrée et à la sortie des métaux que ces effets se manifestent.

Les effets mécaniques de l'électricité sont très-variés, et il faudrait citer un très-grand nombre d'exemples pour montrer les différentes actions qui peuvent se produire; tantôt c'est un transport d'objets; tantôt ce sont des projections qui ont lieu de bas en haut ou latéralement; nous nous contenterons de rapporter les observations suivantes (*Annales du Bureau des longitudes*, 1838, p. 336 et suiv.):

Dans la nuit du 14 au 15 avril 1718, un coup de tonnerre fit sauter le toit et les murailles de Gouesnon près de Brest, comme aurait fait une mine; des pierres

furent lancées dans tous les sens jusqu'à une distance de 51 mètres.

Le 6 août 1809, à Swinton, à 5 milles de Manchester, le tonnerre, en tombant sur la maison de M. Chadwick, produisit des effets mécaniques des plus remarquables. Après des roulements répétés d'un tonnerre éloigné et qui semblait s'approcher, on entendit une explosion épouvantable, qui fut immédiatement suivie de torrents de pluie. Pendant quelques minutes, la maison fut entourée d'une vapeur sulfureuse; un mur en briques, d'un mètre d'épaisseur et de 3^{m},63 de hauteur, fut arraché de ses fondations et soulevé en masse; l'explosion le transporta verticalement, sans le renverser, à quelque distance de là; l'une des extrémités avait avancé de 3 mètres, l'autre de 1^{m},33. Ce mur pouvait peser 26 tonnes, environ 26000 kilogrammes.

L'abbé Nollet rapporte que, le 29 juin 1763, la foudre tomba sur le clocher d'Antranne; elle pénétra dans l'église, fondit ou noircit les dorures des cadres et des contours de certaines niches; elle laissa noircies et demi-fondues des burettes d'étain placées sur une petite armoire; enfin elle perça de deux trous profonds, réguliers comme ceux d'une tarière, la crédence peinte en marbre, contenue dans une niche en pierre de tufeau.

Tous les dégâts ayant été réparés, le 20 juin 1764 le tonnerre tomba sur le même clocher; il passa de là dans la même église, où il noircit les dorures qui l'avaient été en 1763, précisément au même degré, et il fondit celles qu'il avait fondues, juste dans les mêmes limites; les deux burettes éprouvèrent les mêmes altérations que l'année précédente, et les deux trous, qui avaient été bouchés et repeints, furent débouchés de nouveau. Ces faits remarquables indiquent que dans les premières circonstances, la foudre, ayant suivi la ligne de moindre résistance, et rien n'ayant été changé, quand le second orage s'est présenté dans les mêmes conditions, le tonnerre a suivi la même route.

En 1759, le détachement qui conduisait, du Port-

Royal à Saint-Pierre, le capitaine anglais Dibden prisonnier de guerre à la Martinique, s'arrêta, pour se garantir de la pluie, au pied du mur d'une petite chapelle, qui n'avait ni tour ni clocher. Un violent coup de tonnerre le surprit dans cette position et tua deux soldats. Du même coup, la foudre fit dans le mur, derrière les deux victimes, une ouverture d'environ 4 pieds de haut et de 3 pieds de large. Toute vérification faite, il se trouva qu'à la portion du mur démolie, sur laquelle les deux soldats s'appuyaient, correspondait exactement, à l'intérieur de la chapelle, un ensemble de barres de fer massives, destinées à supporter un tombeau. Ceux qui n'eurent pas le malheur de s'être ainsi placés fortuitement devant des pièces métalliques n'éprouvèrent aucun mal.

La foudre perce quelquefois de plusieurs trous les corps qu'elle frappe; en voici quelques exemples. En 1778, dans l'automne, le tonnerre tomba sur la maison de l'ingénieur Caselli, à Alexandrie; il ne fit de dégât appréciable que sur les vitres d'une fenêtre. Ces vitres étaient percées de plusieurs trous de deux lignes environ de diamètre, sans être fendues d'un bord à l'autre.

La foudre transporte avec elle, quand elle frappe des bâtiments, des matières pondérables dans un grand état de ténuité; ces matières sont composées de fer, de soufre, de charbon, etc. Fusinieri a remarqué que ces dépôts sont d'autant plus marqués que l'électricité éprouve plus de difficulté à traverser les corps, et qu'à mesure qu'elle dépose de la matière, elle en prend de nouvelle dans les corps qu'elle traverse.

Nobili a observé, sur des pierres détachées par l'effet de la foudre, une couche de sulfure de fer d'un demi-millimètre de diamètre, et même des cristaux de sulfure de fer qui, d'après leur position, paraissaient avoir été formés dans le trajet de la foudre à travers le métal.

M. Boussingault a reconnu l'existence de l'oxyde de fer sur des arbres foudroyés, ainsi que celle d'une matière charbonneuse sur des roches cyanitiques.

Plusieurs voyageurs ont constaté l'existence du fer métallique sur diverses roches. Il semblerait résulter de là, comme Fusinieri l'a avancé lui-même, que le fer existe dans les nuages orageux, et qu'il est enlevé aux roches situées à la surface de la terre, principalement aux cimes des montagnes.

Pour se rendre compte de tous ces effets, il ne faut pas perdre de vue que l'électricité ne saurait cheminer sans être accompagnée de matière avec laquelle elle semble identifiée.

Nous ne devons pas passer sous silence les effets mécaniques remarquables opérés par la foudre sur le bois; non-seulement elle le brise, mais elle le divise en lattes excessivement minces. On a vu des portions d'arbres dans toute leur séve, desséchées et divisées en longues tiges minces après avoir été foudroyées. Ces effets sont dus à ce que les liquides qui humectent le bois étant seuls conducteurs, lorsque la foudre le frappe, l'action se porte entièrement sur ces liquides, les vaporise peut-être, et par suite divise les portions frappées en lattes longitudinales.

Effets magnétiques. — Quand la foudre traverse des barres de fer, elle y produit des effets magnétiques comme l'électricité. Il arrive quelquefois qu'après un orage, lorsque la foudre a éclaté, les chevilles en fer, les clous et même les aiguilles possèdent la propriété magnétique.

Les orages peuvent altérer l'aimantation des aiguilles de boussole; ils peuvent également déranger la marche des chronomètres, comme M. Duperrey a eu l'occasion de l'observer dans son voyage sur *la Coquille* (partie hydrographique, page 19).

Les montres marines qui se trouvaient à bord avaient été fixées, le 27 octobre 1823, de la manière suivante:

N° 118, de Louis Berthoud.....	— 5″,3
N° 160......................	— 26 ,2
N° 26, de Motel...............	+ 10 ,1

En partant d'Amboine pour se rendre au port Jackson,

il dirigea sa corvette de manière à prendre connaissance de Timor et des îles Savu. « Dans ce premier trajet, « dit M. Duperrey, et notamment en vue de Timor, de « fréquents orages, dans lesquels la foudre éclatait sou- « vent avec un fracas extrême auprès du bâtiment, « sont venus nous assaillir. La conséquence de ces orages « est qu'à notre arrivée auprès des îles Savu, dont la « différence en longitude avec Amboine avait été exacte- « ment déterminée, en 1792, dans le voyage d'Entre- « casteaux, aucune des montres de *la Coquille* ne s'est « trouvée en état d'en fixer la position; leur marche « diurne observée à Amboine n'était plus la même. Ces « montres, qui jusqu'alors permettaient de compter sur « la longitude à moins de 5′ de degrés près, étaient « en erreur aux îles Savu de 15 à 40′, et plus tard, à « l'arrivée de la corvette au port Jackson, elles ont placé « le bâtiment à plus de 40 lieues dans l'intérieur de la « Nouvelle-Hollande.

« Elles furent réglées au port Jackson, et voici quelle « fut leur nouvelle marche diurne, le 19 janvier 1824:

N° 118......... + 7″,0
N° 160......... — 18 ,7
N° 26.......... + 27 ,6 »

On voit par là que les trois montres ont eu toutes leur mouvement accéléré; mais comme cette nouvelle marche diurne donne avec exactitude la différence de longitude entre Savu et le port Jackson, on ne peut attribuer le changement survenu dans leur marche observée à Amboine qu'aux violents orages qui, dans les parages de Timor, ont été si bruyants et si multipliés autour de la corvette.

§ III. — *Des paratonnerres.*

La foudre frappant d'abord, quand elle tombe, les arbres et les édifices élevés, et suivant de préférence les corps métalliques aux autres pour se rendre dans le sol,

on conçoit qu'une longue barre de fer, terminée en pointe, élevée verticalement sur un édifice et communiquant avec la terre humide, sans aucune solution de continuité, doive le protéger efficacement. Une semblable barre de fer convenablement placée constitue le paratonnerre imaginé par Franklin.

Nous ferons remarquer d'abord que lorsqu'un nuage orageux passe au-dessus d'un corps terminé en pointe, il agit sur la terre par influence ; son électricité attire celle de signe contraire du fluide naturel de la tige et repousse l'autre dans la terre ; bientôt l'électricité qui se trouve accumulée à la pointe acquiert une tension telle qu'elle s'échappe pour former du fluide neutre avec celle du nuage voisin. La tension est souvent si considérable que dans l'obscurité, comme on l'a déjà vu en parlant des lueurs électriques, l'électricité s'échappe de la pointe en un torrent continu, sous forme d'aigrettes lumineuses.

Les anciens avaient aussi remarqué tous ces phénomènes, il paraît même qu'ils avaient connaissance du procédé à l'aide duquel on soutire la foudre des nuées : suivant eux, faire descendre le tonnerre ou la divinité était la même chose. Au rapport de Pline, Numa avait eu fréquemment ce pouvoir, et Tullus Hostilius, son successeur, périt pour avoir employé avec maladresse ce dangereux procédé. On trouve effectivement dans Pline ce passage remarquable relatif à Tullus Hostilius : Dans le moment où il imitait d'une manière irrégulière le procédé de Numa, Tullus fut frappé de la foudre. (Pline, lib. II, ch. 53.)

On trouve encore dans Lucain ce passage relatif au même sujet : Aruns, savant Étrurien, instruit dans les mouvements du tonnerre, est dit avoir ramassé les feux de la foudre qui étaient dispersés dans le ciel, et les avoir enfouis dans la terre. (Lucan., *Phars.*, I, 606.) Il est impossible de s'expliquer plus nettement sur l'emploi des paratonnerres pour soutirer la foudre des nuages.

L'expérience a prouvé que, toutes choses égales d'ail-

leurs, plus un paratonnerre est élevé dans l'air, plus il a d'efficacité. On ne sait pas encore au juste la distance à laquelle il étend son action ; cependant l'expérience a appris que toutes les parties des édifices qui sont placées à une distance du paratonnerre de plus de trois ou quatre fois sa longueur ont été foudroyées.

Charles, qui s'est beaucoup occupé de cette question, pensait qu'un paratonnerre pouvait défendre efficacement autour de lui des atteintes de la foudre un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur : cette règle a été admise dans la pratique.

Pour éviter que le paratonnerre soit fondu par le passage de la foudre, on prend une barre de fer de 5 à 10 mètres de hauteur, et de 16 à 20 millimètres en carré. La relation doit être parfaite entre le paratonnerre et un sol humide; car lorsqu'un conducteur offre quelque part des solutions de continuité, il arrive que la foudre, après l'avoir frappé, l'abandonne pour se porter sur un corps voisin qui lui offre plus de facilité pour se rendre dans le sol. Ce changement de conducteur est presque toujours accompagné d'explosion et de dégâts plus ou moins graves. L'extrémité supérieure de la barre est formée d'une tige conique de cuivre jaune doré de 55 centimètres de longueur, et terminée par une petite pointe de platine de 5 centimètres de longueur. Quand le paratonnerre est posé solidement sur le bâtiment, on y adapte le conducteur, dont l'extrémité inférieure se rend dans un puits ou dans un puisard.

Le conducteur est une barre de fer de 13 à 20 millimètres en carré. Pour préserver de la rouille le fer qui s'enfonce dans le sol, on fait courir le conducteur dans une auge remplie de braise de boulanger, qui a, outre l'avantage de préserver le fer de l'oxydation, celui de conduire mieux l'électricité que le charbon ordinaire. L'expérience a prouvé que le fer, ainsi enveloppé de braises, n'éprouvait aucune altération dans l'espace de trente années.

Le conducteur doit être plongé de 65 centimètres au

moins dans l'eau lorsqu'elle est le plus bas possible. Son extrémité inférieure est terminée ordinairement par deux ou trois racines, pour faciliter l'écoulement de l'électricité dans le terrain environnant.

Les barres de fer ne pouvant, à cause de leur rigidité, suivre facilement les contours du bâtiment, on les remplace par des cordons métalliques qui ont l'avantage sur celles-ci de ne point avoir de raccord, ce qui diminue par conséquent les chances de solution de continuité. Ces cordes, qui sont formées de quinze fils de fer tordu, ont ordinairement un diamètre de 16 à 18 millimètres. Pour les préserver de l'action de l'air, chaque fil est goudronné séparément, puis la corde entière.

Quand on pose un paratonnerre, il faut avoir l'attention de faire communiquer avec le conducteur les pièces de métal un peu considérables qui se trouvent dans le bâtiment, telles que les lames de plomb recouvrant le faîtage, les arêtes du toit et les gouttières en métal.

La hauteur des tiges des paratonnerres varie avec les bâtiments sur lesquels on les élève; les dômes et les clochers, par exemple, dominant de beaucoup les objets voisins, on n'a pas besoin pour les protéger de leur donner la même longueur que pour les édifices terminés par un toit très-étendu; aussi n'emploie-t-on que des tiges minces, s'élevant de 1 à 2 mètres au-dessus des croix qui les terminent.

La prudence recommande, quand il s'agit de magasins à poudre, de placer les tiges des paratonnerres à peu de distance, afin d'éviter les effets qui pourraient résulter des solutions de continuité. Enfin nous dirons que lorsque l'on place un ou plusieurs paratonnerres sur un édifice, il faut les faire communiquer ensemble et avec un conducteur commun situé à égale distance de chaque tige. Pour trois paratonnerres, il est prudent de leur donner deux conducteurs. En général, il faut prendre un conducteur particulier pour chaque paire de paratonnerres, et établir une communication intime entre les pieds de toutes les tiges.

SECTION IV.

MÉTÉORES QUE L'ON RAPPORTE A L'ÉLECTRICITÉ.

§ I. — *Des trombes.*

Dans la zone appelée improprement la région des calmes, il éclate des orages accompagnés de vents très-violents; on leur donne le nom de *tornados*, aux Antilles le nom d'*ouragans*. Dans l'Orient, dans les mers de Siam et dans celles de la Chine, ils portent la dénomination de *tyfoongs;* ce nom est très-ancien, car, suivant Hésiode, Typhon est un géant qui enfante les tourbillons accompagnés de feu et les tempêtes suivies de grandes averses. Dampier désigne de la même manière les violents tourbillons qui règnent sur ces côtes dans les mois de juillet, août et septembre. Il décrit ainsi le phénomène : Le temps est serein, le vent doux et modéré; on ne tarde pas à apercevoir une forte nuée au nord-est, très-noire auprès de l'horizon, et d'une couleur rougeâtre foncée vers la partie supérieure. Cette nuée, dont l'aspect est effrayant, précède de douze heures le tourbillon qui, dès l'instant qu'il commence à se mouvoir avec rapidité, ébranle l'atmosphère de telle sorte que le vent s'élève peu à peu et finit par devenir impétueux pendant douze heures dans la direction du nord-est; le vent est accompagné de violents coups de tonnerre, de fréquents éclairs et d'une pluie excessivement forte; la pluie cesse aussitôt que le vent diminue, et le calme reparaît. Ces tempêtes, produites évidemment par les nuages orageux, n'ont pas le caractère des trombes proprement dites, comme on l'a avancé.

Nous nommerons trombes des amas de vapeurs épaisses, animées souvent d'un mouvement rapide de rotation et de translation, ayant la plupart du temps la forme d'un cône dont la base est dirigée le plus souvent vers les nuages, le sommet vers la terre, et quelquefois dans une position inverse. Ces amas font entendre un bruit assez

semblable à celui d'une charrette courant sur un chemin rocailleux.

Ces météores déracinent les arbres, les dépouillent de leurs feuilles, les foudroient, les clivent et les transportent à de grandes distances; ils renversent les maisons, enlèvent leur toiture, les carreaux et même les pavés, détruisent ou brisent tout ce qui se trouve sur leur passage; souvent ils déversent de la pluie et de la grêle; souvent aussi ils sont accompagnés de globes de feu, lancent des éclairs, font entendre le bruit du tonnerre, et se dissipent assez ordinairement après.

Les trombes s'observent aussi bien sur mer que sur terre; les physiciens sont partagés d'opinion sur leur origine. Les uns leur accordent une origine électrique; les autres les attribuent exclusivement à des courants d'air : nous développerons successivement les deux théories.

Pour tâcher de remonter aux causes qui interviennent dans la production des trombes, nous commencerons par donner la description de plusieurs de ces météores. Le premier exemple que nous prendrons est la trombe qui se manifesta à Châtenay, canton d'Écouen, département de Seine-et-Oise, et qui ravagea une partie de la commune, le 18 juin 1839. Ayant été témoin des désastres, nous garantissons l'exactitude des faits consignés dans la relation suivante qui est due à M. Peltier.

Dès le matin, un orage formé au sud de Châtenay s'était dirigé, vers les dix heures, dans la vallée, entre les collines d'Écouen et le monticule de Châtenay. Les nuages étaient assez élevés, et, après s'être étendus jusqu'au-dessus de l'extrémité est du village, ils s'arrêtèrent; le tonnerre grondait, et le premier nuage suivait la marche ordinaire, lorsque, vers midi, un second orage, venant également du sud et marchant assez rapidement, s'avança vers la même plaine et le même monticule. Arrivé à l'extrémité de la plaine au-dessus de Fontenay, en présence du premier orage qu'il dominait par son élévation, il y eut un temps d'arrêt à dis-

tance; sans doute les deux orages se présentaient l'un à l'autre par leurs nuages chargés de la même électricité, et ils agissaient l'un sur l'autre par la même répulsion.

Jusque-là le tonnerre s'était fait entendre dans le second orage, lorsque tout à coup un des nuages inférieurs, s'abaissant vers la terre, se mit en communication avec elle, et toute explosion parut cesser. Une attraction prodigieuse eut lieu; tous les corps légers, toute la poussière qui recouvrait la surface du sol, s'élevèrent vers la pointe du nuage; un roulement continuel s'y faisait entendre; de petits nuages voltigeaient, tourbillonnaient autour du cône renversé, montaient et descendaient rapidement. Les arbres placés au sud-est de la trombe, en furent atteints dans leur moitié nord-ouest qui la regardait; l'autre moitié en fut préservée et conserva son état normal. Les portions atteintes éprouvèrent une altération profonde, dont nous parlerons plus bas, tandis que les autres portions gardèrent leur séve et leur végétation. La trombe descendit dans la vallée à l'extrémité de Fontenay, vers des arbres plantés le long d'un ruisseau sans eau, mais encore humide; puis, après avoir tout brisé et déraciné, elle traversa la vallée et s'avança vers d'autres plantations d'arbres à mi-côte, qu'elle détruisit également. Là, la trombe s'arrêta quelques minutes; elle était parvenue au-dessous des limites du premier orage, et celui-ci, jusque-là stationnaire, commença à s'ébranler et à reculer vers la vallée ouest de Châtenay. Ayant desséché et bouleversé le plant Thibault, elle s'avança, en renversant tout sur son passage, vers le parc du château de Châtenay, qu'elle transforma en un lieu de désolation. Les plus jeunes arbres seulement, placés à l'extrémité en dehors de la trombe, sont les seuls qui restèrent; les murs furent renversés; le château et la ferme perdirent leurs toitures et leurs cheminées. Des arbres furent transportés à plusieurs centaines de mètres; des pannes, des chevrons, des tuiles furent projetés jusqu'à 500 mètres et plus.

La trombe ayant tout ravagé, descendit le monticule vers le nord, s'arrêta au-dessus d'un étang, renversa et dessécha la moitié des arbres, tua tous les poissons, marcha lentement le long d'une allée de saules dont les racines baignaient dans l'eau, et perdit dans ce passage une grande partie de son étendue et de sa violence. Elle chemina plus lentement encore dans une plaine à la suite; puis, à 1000 mètres de là, près d'un bouquet d'arbres, elle se partagea en deux portions; l'une s'élevant en nuages, et l'autre s'éteignant sur la terre.

Tous les arbres frappés par la trombe ont présenté les mêmes caractères : toute leur sève a été vaporisée. Le ligneux a été desséché comme si on l'avait tenu, pendant quarante-huit heures, dans un four chauffé à 15°. Cette quantité immense de vapeur, formée instantanément, n'a pu s'échapper qu'en brisant l'arbre, en se faisant jour de toutes parts; comme les fibres ligneuses sont moins cohérentes dans le sens longitudinal que dans le sens horizontal, ces arbres ont tous été clivés en lattes dans une portion du tronc.

Voici maintenant la relation d'une trombe de mer, consignée dans une lettre d'un gentilhomme de New-York, et lue à la Société royale de Londres le 4 novembre 1756. Cette trombe a été observée pendant un calme plat, à 30 ou 40 mètres du vaisseau où il se trouvait; elle consistait en un cône renversé touchant la mer de sa pointe, dans une étendue de $2^m,66$, et les nues par une immense base. « Elle passa tellement près du vaisseau, dit-il, que je pus parfaitement observer qu'un « courant de vent violent sortait de la trombe. Il faisait « une excavation de deux mètres de diamètre sur la surface de la mer; ce qui produisait un grand anneau « circulaire et inégal par la projection de l'eau, comme « serait le vent d'un fort soufflet frappant perpendiculairement la surface de l'eau, et j'entendis parfaitement le sifflement. Je suis sûr qu'il n'y avait aucune « attraction qui fît montrer l'eau dans la colonne de la « trombe, si ce n'est les projections écumeuses dont je

« viens de parler. Je pus parfaitement distinguer un es-« pace de 2^m,66 environ entre le bout du cône et la « mer, dans lequel rien n'interrompait la vue : ce qui « aurait eu lieu si l'eau de la mer était montée dans le « cône.

« Dans le même voyage, ajoute-t-il, je vis plusieurs « autres trombes, mais de plus loin; aucune ne descen-« dit si près de la surface de la mer; l'axe de quel-« ques-unes était très-incliné, et même plié en arc. « Aucune succion de l'eau de la mer n'avait lieu. Je « crois que c'est par le courant de vent sortant de ces « trombes que sombrent les vaisseaux si soudainement. « J'ai entendu dire par les équipages que les vaisseaux « étaient parfaitement calmes avant le choc du vent qui « les renversait : ce qui ne peut se comprendre que d'un « courant venant des mers. J'ajouterai que dans une « trombe qui assaillit un vaisseau, elle déversa sur lui « de l'eau douce. »

Les trombes produisent en général trois effets bien distincts sur les eaux : des nues fuligineuses s'élevant sur une surface assez étendue et allant se réunir à la nue descendante; une dépression de l'eau au-dessous même de la trombe avec un mouvement giratoire; enfin, de l'eau enlevée. Souvent, au lieu d'un cône ascendant d'eau, on observe un cône renversé, creusé dans la mer et dont le bout inférieur paraît libre au milieu du cercle de vapeur qui ceint cette dépression; souvent lorsque le milieu des eaux soulevées est plus compacte, le météore apparaît comme un pilier placé pour soutenir la colonne descendante; enfin, cette colonne ou trombe marine fait entendre un bruit variant considérablement depuis le sifflement du serpent jusqu'au bruit d'une lourde charrette courant sur un chemin rocailleux. Ce bruit est plus fort sur terre que sur mer, et sur des terrains secs que sur des terrains humides.

Lorsqu'une communication s'établit entre les nuages et la mer, laquelle ne consiste quelquefois qu'en un simple amas de petits nuages ou lambeaux de vapeur, on observe

une grande agitation au-dessous du nuage inférieur sur la mer, comme on le remarque également sur le sol; des courants d'air de la circonférence au centre ou du centre à la circonférence prennent naissance et donnent lieu par leur rencontre à une tourmente plus ou moins violente; il se manifeste aussi un mouvement giratoire qui n'est pas cependant toujours sensible, puisque des trombes, formées au milieu d'un calme plat, en sont dépourvues. Il faut remarquer qu'elles sont accompagnées en général d'éclairs, du tonnerre, de grêle et de pluie. Bien que l'électricité ne manifeste pas toujours sa présence par des signes extérieurs, tels que la foudre et les éclairs, néanmoins on est porté à croire que sa puissance se révèle par d'autres effets, tels que des attractions et des répulsions qui déplacent les corps sans bruit et sans lumière.

Nous ajouterons encore, pour l'intelligence de ce que nous avons à dire touchant l'explication des trombes, que, dans un relevé statistique de 116 trombes, fait par Peltier, il s'en est trouvé 29 ayant un mouvement giratoire continu, ou seulement pendant une partie de leur durée; dans ce nombre, il y en avait 11 de mer et 18 de terre. 22 trombes n'ont présenté aucune agitation intérieure, savoir : 9 de mer et 13 de terre. 41 ont été accompagnées d'éclairs, de tonnerre, ou de phénomènes lumineux quelconques, savoir : 16 de mer et 25 de terre. Dix ont transporté des objets contre le vent. 16 ont donné de la grêle, dont 7 de mer et 9 de terre. 6 trombes se sont évanouies dans une atmosphère sans nuage, sans qu'elles eussent été précédées d'aucune tourmente.

Trois trombes de mer ont inondé d'eau douce les vaisseaux qui se sont trouvés sur leur passage, quoique le météore fût ascendant. 3 trombes ont permis de voir la dépression de la surface des eaux. 2 trombes ont servi d'intermédiaire entre deux groupes de nuages. Dans 15 trombes, on a vu l'eau monter, et dans 8 l'eau descendre. Dans 8 on a senti l'odeur du soufre. Dans 6 cas on a observé plusieurs trombes au même instant. 34 ont

présenté des particularités remarquables. Buchanan en a dessiné une qui avait trois origines.

Le capitaine Beechey en a observé une qui avait trois cônes (pl. VII, fig. 21) sortant du même pavillon, lesquels se réunirent bientôt, pour se diviser ensuite.

Les trombes marines ont manifesté leur formation par l'agitation de l'eau et par les vapeurs nombreuses qui s'en élevaient; celles de terre, par l'enlèvement des corps légers qui s'y trouvaient; la trombe de Carcassonne a décarrelé une chambre, sans renverser aucun des objets qui s'y trouvaient. Le bruit, enfin, a varié suivant la nature de la trombe; il était plus fort sur terre que sur mer.

Théories des trombes.

Théorie électrique. — Le phénomène des trombes a de tout temps attiré l'attention des observateurs; on avait pensé d'abord que des courants d'air leur donnaient seuls naissance; mais il est une objection difficile à résoudre dans cette hypothèse, c'est qu'elles se manifestent souvent au milieu du calme de l'atmosphère. Brisson (*Mémoires de l'Académie des sciences*, 1767, t. LXXXV, p. 409) paraît avoir eu l'idée le premier de les rapporter à l'électricité, en ayant égard aux effets puissants d'attraction et de répulsion que cet agent peut mettre en jeu. On conçoit en effet que si un nuage vient à s'approcher assez près de l'eau pour que sa puissante tension électrique agisse par influence sur ce liquide, alors celui-ci peut être soulevé. Peltier, qui a repris cette hypothèse, a ajouté quelques expériences dont nous allons parler, et qui sont propres à nous faire concevoir comment les divers effets mécaniques peuvent se manifester.

On peut reproduire ces effets en supposant que le nuage soit représenté par un globe de métal constamment électrisé et couvert de pointes, et, mettant dans sa sphère d'activité des vapeurs, des poussières et de l'eau; avec l'eau, la dépression du liquide a lieu; avec

des poussières, on a des courants directs du centre à la circonférence, se transformant en mouvements giratoires. Tous ces effets disparaissent en remplaçant le globe armé de pointes par un globe poli. Au lieu de dépression du liquide, on obtient une protubérance; l'attraction devenant plus considérable, l'eau s'élève en masse, et l'accélération de la vaporisation augmente.

Quand on place, entre un plateau de cuivre inférieur non isolé et une sphère supérieure électrisée, une petite boule légère, elle s'élance de l'un à l'autre, comme dans la danse des pantins; mais en remplaçant cette petite boule par des corps successivement allongés et plats, de manière à ne plus présenter à la fin qu'une bande longue et étroite, d'or battu par exemple, le mouvement primitif de va-et-vient est transformé en un mouvement oscillatoire, puis en un tourbillonnement qui se termine par un mouvement rapide de rotation entre les deux corps.

L'attraction d'un nuage électrique est ordinairement accompagnée, comme on l'observe dans les trombes, du refoulement de l'air vers ce nuage, d'où résultent des courants cheminant de l'extérieur à l'intérieur, et partant de tous les points de la circonférence; d'une projection de vapeur d'eau, d'eau liquide, de corps légers ou pesants, enlevés ou arrachés à la terre, suivant la puissance de l'attraction. On suit, sur mer comme sur terre, la marche de cette puissance attractive. L'attraction des nuages est prouvée encore par une accélération prodigieuse dans l'évaporation des eaux et l'abaissement de température, effets que l'on obtient facilement au moyen de l'électricité.

La répulsion électrique, dans cette hypothèse, est prouvée par les courants d'air provenant du nuage électrique, et ne se faisant sentir que dans son voisinge; il règne un calme plat à peu de distance; effets également produits au moyen de l'électricité. La répulsion est encore démontrée par le cône rentrant qui se forme dans la mer, au centre même des vapeurs fuligineuses.

On peut concevoir la production du cône nuageux en contact avec la terre, déterminée par deux motifs : d'abord, les nuages électrisés, exerçant une action par influence sur le sol, provoquent naturellement une attraction de la part de ce dernier. Les nuages obéissent alors à cette attraction, et s'approchent d'une quantité dépendante du pouvoir attractif et de leur densité. D'un autre côté, lorsque des nuages supérieurs, ayant la même électricité que des nuages inférieurs, viennent agir sur ceux-ci par répulsion, les nuages placés au-dessous étant repoussés, peuvent approcher de la terre suffisamment pour s'y décharger sans explosion, par l'intermédiaire d'autres nuages qui touchent le sol et servent de conducteurs.

Il arrive souvent aussi que les corps placés à la surface de la terre, sous ces nuages ayant la forme de cônes renversés, servent de conducteur avec le sol. Les corps légers ou de peu de volume, chargés d'électricité contraire, sont attirés et soulevés vers la trombe. Quand leur électricité est neutralisée, ils retombent sur la terre, pour se charger d'une nouvelle quantité d'électricité, puis remontent, et ainsi de suite, comme dans l'expérience de la danse des pantins ; c'est ainsi que se forme un immense nuage de poussières. Si ces corps sont attachés à la terre, comme les arbres, ils se chargent instantanément d'une immense quantité d'électricité ; la terre qui est contiguë partage cet état électrique ; elle cède à l'action attractive de la trombe, et les arbres sont arrachés et transportés au loin. Tous ces effets varient d'intensité, suivant la conductibilité des corps et celle des diverses parties du terrain.

Quand la densité des nuages s'oppose à un abaissement suffisant pour produire un écoulement continu d'électricité, alors des décharges à distance ont lieu, l'éclair sillonne les nuages et la foudre se fait entendre ; la tension électrique diminue successivement, la pluie survient, et le nuage se relève. Le tonnerre cesse de se faire entendre dès l'instant qu'une conductibilité suffisante est établie entre le sol et les nuages.

D'après cette théorie, une trombe serait un conducteur imparfait entre les nuages orageux et la terre, lequel conducteur produirait tous les effets que nous observons. Quant au bruit qui accompagne le météore, on l'attribuerait à une multitude de petites décharges partielles, dont l'intensité varïerait avec la conductibilité des substances. Ce bruit serait plus fort à l'extrémité des trombes qui traversent les montagnes, à cause des poussières et des terres meubles qui serviraient d'intermédiaire; il perdrait de son intensité au-dessus de la mer, en raison de la meilleure conductibilité des particules aqueuses et de leur égale distribution.

Peltier, en s'appuyant sur la marche de l'air dans les diverses actions attractives et répulsives dues à l'électricité, et en ayant égard à la rencontre des courants contraires et d'inégale force, d'obstacles divers, a cherché à expliquer comment le mouvement direct imprimé à l'air se change en un mouvement giratoire plus ou moins prononcé. Relativement aux effets électriques d'influence sur l'eau, si le nuage est régulier ou s'il agit à une distance telle que la décharge électrique ne puisse s'effectuer, il en résulte une attraction du liquide qui se trouve dans un état électrique contraire; l'eau s'élève en protubérance conique, et s'abaisse aussitôt que la décharge s'est effectuée. Si le corps électrisé ou le nuage est couvert de pointes ou d'aspérités, et que l'eau reçoive une quantité considérable d'électricité, il s'établit alors dans l'eau un phénomène analogue à celui de l'air : les couches supérieures recevant plus d'électricité qu'elles n'en peuvent écouler, sont repoussées par le nuage et se refoulent elles-mêmes les unes sur les autres. Il se fait alors une dépression au-dessous, laquelle est bientôt remplacée par les couches inférieures; il en résulte des courants directs qui se changent bientôt en mouvements giratoires, comme dans l'expérience citée sur les vapeurs et l'air.

En partant du même principe, on peut expliquer l'évaporation successive de l'eau des mares, et même la

disparition de la masse d'eau entière, quand les tensions électriques sont suffisantes. Dans ce cas, ces masses sont enlevées comme les arbres et les autres corps qui se trouvent à la surface de la terre.

Théorie de M. Espy. — Dans l'hypothèse précédente, l'électricité joue le rôle principal, les courants d'air qui se manifestent ne sont que des accessoires, et une trombe est un phénomène entièrement distinct des tornados et des ouragans, dans lesquels l'action mécanique de l'air est la cause de tous les dégâts observés. Dans la seconde hypothèse que nous allons développer, M. Espy au contraire considère les trombes comme produites par des courants d'air et les rattache aux ouragans ou aux tornados.

Lorsque ces météores se produisent, l'air, d'après M. Espy, est toujours mû de la circonférence au centre si le tornado a la forme arrondie, ou suivant une ligne diamétrale, dans le cas où il a une forme allongée et qu'il occupe une étendue de plusieurs centaines de lieues. Lorsque le tornado est très-petit, on voit au centre un nuage de plus en plus conique, dont la pointe finit par toucher la terre ou la mer. Ce fait est mis en évidence, suivant M. Espy, en prenant en considération le sens, la force et la direction du vent, d'après les arbres renversés au même instant et les traces que laisse le météore de son passage sur le sol.

Au centre, il se produit un courant d'air ascendant d'une rapidité excessive qui, après s'être élevé à une hauteur prodigieuse, se déverse en pluie ou en grêle de tous côtés. Ce courant ascendant se change en un cumulus dont la base est horizontale et dont la hauteur est déterminée par la température et l'état hygrométrique de l'air ; ce nuage central se manifeste tant que dure le mouvement ascensionnel. La production de la pluie ou de la grêle est due, suivant M. Espy, au refroidissement provenant de la dilatation de l'air emporté dans les régions supérieures de l'atmosphère, d'où résulte une précipitation d'eau. Quant à la foudre qui accompagne

ce phénomène, elle ne serait qu'un effet accessoire.

Telles sont les bases sur lesquelles M. Espy appuie la nouvelle théorie des trombes. Le mouvement de déplacement du météore entier est très-faible relativement à la vitesse du vent dans l'intérieur du tornado. M. Espy assure avoir constaté que la hauteur du baromètre, dans l'intérieur de ce météore, est quelquefois 60 millimètres plus bas que vers les bords ; que sur toute sa périphérie il existe une ligne courbe, fermée, le long de laquelle le baromètre se trouve à sa hauteur normale, tandis qu'au-delà, en dehors, la hauteur barométrique est plus élevée de 20 millimètres, et de 10 ou 12 pour des météores d'une très-grande étendue.

En examinant les effets produits par le mouvement de translation, on trouve constamment que les arbres renversés, dont la cime est tournée vers les positions antérieures du centre du tornado, sont recouverts par les arbres tombés dans la direction du centre, à une époque postérieure.

M. Espy assure avoir constaté par l'observation le mouvement de l'air vers le centre du météore, la dépression barométrique dans l'intérieur, le courant central ascendant, la formation d'un nuage à une certaine hauteur et son déversement circulaire quand ce nuage a atteint une certaine hauteur; enfin le mouvement de déplacement du météore en masse.

Pour que le phénomène ait lieu, M. Espy signale comme circonstance éminemment favorable, un air chaud et humide recouvrant une contrée ou une masse liquide suffisamment plane et étendue, assez tranquille pour que le mouvement ascendant de la partie qui est accidentellement la moins dense puisse se produire à une grande hauteur perpendiculaire au-dessus du milieu de l'espace échauffé et chargé de vapeur transparente; enfin, il faut que dans les régions supérieures l'air soit sec et froid, contrastant par conséquent avec celui du courant ascendant qui se dilate, et perde sa transparence par la précipitation de son humidité tout en con-

servant une densité moindre que l'air environnant.

La force ascensionnelle, au lieu de diminuer par l'effet de l'élévation de la colonne soulevée, ne fait que s'accroître avec la hauteur de la colonne, de même qu'une colonne d'air chaud qui sort d'une cheminée ou d'un tuyau de poêle s'élève d'autant plus haut que le tuyau est plus long. Il est nécessaire pour cela que le courant ascendant, chaud et humide, soit constamment plus léger dans chacune de ses parties que l'air se trouvant à la même hauteur en dehors de la colonne ascendante. M. Espy a, en effet, cherché à prouver, par le calcul et par l'expérience, que la colonne d'air humide, regagnant en température par la vapeur qui se précipite une portion de la chaleur que lui fait perdre son expansion, doit rester plus chaude que l'air situé à la même hauteur de chaque côté. Il a appliqué sa théorie à la formation d'un nuage analogue au cumulus aussitôt que l'air chaud et humide a atteint une expansion telle que le froid qui en résulte produit la précipitation de l'eau. Il a expliqué également pourquoi, dans les petits tornados dont la violence est considérable, il doit se produire à une très-petite hauteur dans le centre du météore, une dilatation suffisante pour précipiter de la vapeur.

Quant au déplacement du météore, M. Espy avance qu'il pourrait dépendre d'un vent ordinaire qui ne troublerait pas le mouvement ascensionnel de la colonne d'air humide; ces phénomènes ne se manifestant que lorsque les couches d'air inférieur sont très-calmes, il pourrait se faire que le vent en question régnât seulement dans les régions supérieures de l'atmosphère. Dans les latitudes moyennes, ce mouvement doit avoir lieu vers l'ouest, et dans les régions équatoriales, dans le sens des alisés, c'est-à-dire vers l'est.

Enfin M. Espy tire comme conséquence de sa théorie que dans plusieurs localités, comme à la Jamaïque, les brises de mer donnent lieu à un mouvement de l'air semblable à celui qui constitue le tornado, et qu'il en

résulte également de la pluie, de l'orage, à des heures fixes de chaque jour d'été; que de semblables effets se retrouvent dans les éruptions volcaniques et dans les grands incendies de forêts, en admettant toutefois des circonstances favorables de calme, de chaleur et d'humidité.

Il serait à désirer que les principes sur lesquels s'appuie M. Espy pour expliquer les trombes fussent vérifiés par l'expérience, pour savoir jusqu'à quel point sa théorie doit inspirer une entière confiance; certainement, il est possible que les courants d'air interviennent dans la production de ces météores, mais jusqu'à présent, d'après ce que nous avons vu dans la description des phénomènes, on est porté à croire que la cause déterminante des trombes proprement dites, est l'électricité, quand on voit surtout cet agent produire des effets tellement analogues à ceux qu'elles présentent, qu'on doit être tout disposé à leur attribuer une origine commune.

§ II. — *De la grêle.*

La grêle est un des phénomènes météorologiques qui offrent le plus de difficulté dans leur explication. Pour apprécier la valeur des théories mises en avant, il faut décrire le phénomène et toutes les circonstances qui précèdent et suivent sa production. M. Arago a publié à ce sujet, dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* pour 1828, un article plein d'intérêt, auquel nous renvoyons le lecteur, et dans lequel nous puiserons nous-mêmes quelques détails.

La chute de la grêle est toujours précédée d'un bruissement particulier dans les airs, que l'on compare à celui que fait entendre un sac de noix que l'on agite fortement; elle est, en outre, toujours accompagnée d'effets électriques, comme la pluie et la neige; le tonnerre se fait quelquefois entendre avant le bruit précurseur; il se fait entendre aussi pendant la chute même. Il semblerait donc que l'électricité intervient d'une ma-

nière quelconque dans la production du phénomène; mais comme de pareils effets se produisent dans les pluies orageuses, on ne peut en conclure que réellement la grêle ait une origine électrique. Nous ferons observer encore qu'à l'approche d'un nuage de grêle, l'électromètre change fréquemment de signe, en même temps qu'il indique de grandes différences dans l'intensité électrique.

La grêle tombe sous les tropiques comme dans nos climats, mais il paraît que dans les plaines elle est fort rare; ainsi, à Cumana, elle est inconnue, mais à 500 ou 600 mètres au-dessus du niveau de la mer, elle devient plus commune.

Dans nos climats, la grêle se forme le plus ordinairement dans le printemps et l'été, aux heures les plus chaudes de la journée; rarement il en tombe pendant la nuit.

Nous citerons à cette occasion le tableau donné par M. Kaemtz, pour représenter la fréquence de la grêle aux différentes heures du jour; les nombres que ce tableau renferme sont les résultats de toutes les grêles qui sont tombées en Allemagne et en Suisse à la connaissance de ce météorologiste.

On voit que c'est vers deux heures de l'après-midi, ou au moment de la plus forte chaleur du jour, que la grêle est le plus fréquente, et que le printemps et l'été sont éminemment favorables à sa production.

La grêle précède les pluies d'orage et les accompagne quelquefois, mais rarement elle les suit. Les nuages qui déversent la grêle sont ordinairement très-épais, et ont une nuance cendrée qui leur est propre; leurs bords sont échancrés, et leurs surfaces sont remplies çà et là de protubérances très-irrégulières : on a remarqué qu'ils sont en général peu élevés.

Pour donner une idée de l'espace considérable du ciel et de la terre qu'occupe quelquefois ce fléau dévastateur, nous rapporterons quelques détails sur l'orage qui a ravagé une partie de la France et de la Hol-

HEURES.	HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.	ANNÉE.
Midi.	1	8	10	5	24
1h	4	18	8	6	36
2	10	38	15	13	78
3	4	19	11	8	42
4	5	14	17	1	37
5	4	16	13	3	36
6	1	9	8	5	23
7	1	6	10	»	17
8	1	3	3	4	11
9	2	18	6	3	29
10	3	2	3	1	9
11	1	»	»	1	2
Minuit.	»	»	2	»	2
1h	»	»	1	»	1
2	»	»	2	»	2
3	»	»	»	1	1
4	1	»	»	»	1
5	2	2	»	1	5
6	1	1	»	»	2
7	7	13	3	6	29
8	4	3	1	2	10
9	3	6	2	»	11
10	2	8	3	1	14
11	1	10	4	5	20
TOTAL....	58	194	122	66	440

lande, le 13 juillet 1788, et dont on a une description exacte. (*Mémoires de l'Académie des sciences*, 1790, p. 263.)

L'orage formait deux bandes à peu près parallèles, l'une orientale, l'autre occidentale. La première, qui était la plus étroite, avait cinq lieues dans sa plus grande largeur, une demi-lieue dans sa plus petite, et, dans sa largeur moyenne, deux lieues et un quart. La seconde avait également cinq lieues dans sa plus grande largeur, trois lieues dans sa plus petite, et quatre lieues dans sa largeur moyenne.

Ces deux bandes étaient séparées par une autre, sur laquelle il ne se déversa qu'une pluie abondante; sa largeur moyenne était de cinq lieues et un quart.

A l'orient de la bande orientale, et à l'occident de la

bande occidentale, il y eut aussi beaucoup de pluie, mais sur une largeur qui n'a pas été déterminée.

Ces bandes légèrement ondulées étaient dirigées du sud-ouest au nord-est; une ligne droite tirée d'Amboise à Malines formait à peu près le milieu de la bande orientale, et une autre ligne droite, tirée de l'embouchure de l'Indre, dans la Loire, jusqu'à Gand, formait à peu près le milieu de la bande occidentale.

Sur cette longueur, qui est de plus de cent lieues pour chaque bande, il n'y eut aucune interruption dans l'orage; et il est même à croire, d'après des renseignements précis, qu'il couvrit encore plus de cinquante lieues au midi, et autant au nord.

Dans cette immense étendue tous les points ne furent pas frappés en même temps; on constata que la marche de ce météore avait été très-rapide, depuis les Pyrénées, où il paraît avoir pris naissance, jusque dans la Baltique où l'on en perdit la trace. La vitesse était de 16 lieues 1/2 à l'heure sur les deux bandes; la bande orientale avait un peu d'avance sur la bande occidentale; dans chaque lieu, la grêle ne tomba que pendant sept ou huit minutes. Les grêlons n'avaient pas tous la même forme : les uns étaient ronds, les autres longs et armés de pointes; les plus gros pesaient une demi-livre.

En France, il y eut 1039 paroisses dévastées; le dommage causé fut évalué par une enquête officielle à près de vingt-cinq millions (24690000 fr.)

Un grêlon est ordinairement formé de plusieurs couches distinctes de glace transparente autour d'un noyau blanc, opaque, qui n'est autre qu'un flocon de neige; quelquefois les couches concentriques sont alternativement diaphanes et opaques. La grosseur de chaque grain est très-variable : on en voit de la grosseur d'une noix, et quelquefois de plus gros. On a vu des grêlons du poids de 100, 200 et même 300 grammes. Comment concevoir que des morceaux solides de glace aussi pesants, dont l'ensemble compose ces nuages couleur de cendre qui annoncent la grêle, puissent se soutenir en l'air, se

développer ou rester immobiles dans l'amas de nuages obscurs qui couvrent une partie du ciel?

Volta a essayé de rendre compte de ces différents effets, tout en ne dissimulant pas les difficultés que nous venons de signaler. Commençons par expliquer, suivant lui, le froid qui congèle l'eau, et la cause en vertu de laquelle un grêlon, qui a déjà acquis un certain volume, reste encore suspendu dans l'air assez longtemps pour arriver à un volume qui va quelquefois jusqu'à trois décimètres de circonférence. Le froid excessif qui parvient à congeler les molécules aqueuses en été, au milieu du jour, dans une région inférieure à celle des neiges, a été considéré par lui comme le résultat d'une évaporation extrêmement rapide et abondante, produite par les rayons du soleil qui frappent la partie supérieure des nuages, évaporation qui est d'autant plus rapide que l'air est plus raréfié et plus électrisé, en admettant, comme du reste le fait est prouvé, que l'électricité favorise à un haut degré l'évaporation. D'après cela, une portion du nuage, en se vaporisant, abaisse assez la température de l'autre portion pour la congeler.

Il rappelle encore en faveur de son opinion le fait observé par les académiciens français en Laponie, lesquels ayant introduit de l'air excessivement froid dans une chambre chaude et pleine de vapeurs où ils se trouvaient, virent en peu de temps leurs habits et le sol couverts de petits flocons de neige.

Volta rejette l'opinion des physiciens qui ont avancé que le noyau, d'abord très-petit, se revêt de couches successives de glace pendant sa chute, en donnant pour raison que les nuages sont à trop peu de distance de la surface de la terre, et que le grain primitivement gelé ne mettrait pas assez de temps pour tomber à terre, de manière à s'encroûter suffisamment pour acquérir la grosseur d'une noix. Il ne voit en conséquence que l'électricité qui soit capable de retenir les grains suspendus en l'air, même lorsqu'ils ont acquis une certaine grosseur. Voici comment il explique cette intervention :

Les nuages orageux possédant une quantité énorme d'électricité, leurs parties extérieures sont fortement repoussées : il en résulte une grande irrégularité dans leurs bords et les diverses courbures de leurs surfaces, comme on l'observe effectivement. Ces nuages sont accompagnés quelquefois de petits nuages, condensés dans la partie inférieure seulement qui est moins électrisée que celle qui est au-dessus. Supposons, dit Volta, qu'un de ces nuages fortement électrisé soit congelé presque subitement à la face supérieure, par suite d'une très-grande évaporation; il en résultera alors une multitude de petits glaçons, qui seront les noyaux des grains de grêle. Ces noyaux, rejetés en haut par la forte répulsion électrique du nuage, seront tenus en suspension à une certaine distance, de la même manière qu'un flocon de coton ou tout autre corpuscule léger est tenu suspendu en l'air au moyen d'un tube de verre électrisé qu'on place au-dessous. C'est ainsi que, si l'on met des corps légers sur un large plateau isolé et horizontal, on peut, en l'électrisant fortement, les voir s'élever dans l'air et s'y soutenir aussi longtemps que le plateau reste électrisé : telle est l'image de la formation de la grêle. Si cette comparaison est exacte, il faut que les grains de grêle exécutent, à mesure qu'ils deviennent plus gros, les mêmes mouvements que les corpuscules légers soumis à l'action du plateau électrisé. Ces grains oscillent donc au-dessus du nuage fortement électrisé, et tombent successivement en vertu de leur propre poids, quand ils ont perdu leur électricité. Ils arrivent alors à la partie électrique du nuage, où ils prennent de l'électricité et sont chassés de nouveau; ceux qui ne peuvent surmonter la force de leur chute tombent à terre. Ce seraient ces grains rares et solitaires qui s'échappent çà et là, et précèdent la grêle abondante qui va bientôt tomber. Le mouvement et la suspension des autres grains qui voltigent au-dessus du nuage, diminuent à mesure que leur masse individuelle s'accroît par l'adjonction de nouvelles couches d'eau glacée, et que la force de l'é-

lectricité diminue; il arrive enfin un instant où, entraînés par leur propre poids, ils tombent en abondance sur la terre.

Volta a senti la nécessité, pour compléter son explication, de supposer l'existence de deux ou plusieurs nuages l'un au-dessus de l'autre, électrisés contrairement. Dans ce cas, on peut se représenter les grains de grêle, non-seulement comme suspendus et flottants, mais encore comme se trouvant dans une vive agitation, poussés et repoussés de la couche du nuage électrisé en plus à celle du nuage électrisé en moins, comme le sont les balles de sureau dans la danse des pantins. Quant au bruissement qu'on entend à l'instant où la grêle tombe, Volta l'attribue au choc des grêlons les uns contre les autres lorsqu'ils sont ballottés d'un nuage à l'autre.

Cette théorie n'est pas à l'abri de toute objection : en effet, on ne conçoit pas comment il se fait que deux nuages électrisés différemment ne soient pas immédiatement ramenés à l'état neutre quand il existe un si grand nombre de petits conducteurs qui établissent continuellement la communication entre eux ; on ne conçoit pas non plus comment des glaçons pesant quelquefois une demi-livre peuvent être renvoyés d'un nuage à l'autre comme des corps légers, car les vésicules des nuages qui sont moins pesantes que les grêlons devraient, à plus forte raison, obéir à l'action attractive et mélanger ces masses nuageuses; mais en supposant même que l'électricité recélée par les nuages orageux soit considérable et qu'un semblable ballottage eût lieu, alors on devrait apercevoir un feu continuel d'étincelles, ce qui n'a jamais été observé. En outre, le ballottement des grêlons ne peut se passer comme Volta l'a imaginé. Dans la danse des pantins, les plaques métalliques électrisées, entre lesquelles oscillent les balles de sureau, ne se laissent pas pénétrer. Or, si l'on substitue à la plaque inférieure une nappe d'eau, cette danse n'a plus lieu; les balles, en descendant, pénètrent dans le liquide et ne se relèvent plus. Les nuages doivent présenter le même

phénomène. Il résulte de là que, pour peu qu'en vertu de la vitesse acquise du choc d'autres grêlons il y ait pénétration dans le nuage inférieur, toute répulsion devrait cesser et les grêlons enfoncés tomberaient de temps à autre sur la terre pendant des heures entières, ce qui est contraire à l'observation.

D'un autre côté, il est impossible d'admettre la congélation des nuages par l'action seule des rayons solaires, attendu que le rayonnement solaire ou toute autre cause calorifique ne peut hâter l'évaporation d'un liquide quelconque sans amener son échauffement. On a cité, par exemple, contre sa théorie, l'expérience suivante : si l'on entoure de linges mouillés deux thermomètres parfaitement semblables, l'un exposé à l'ombre, l'autre au soleil, on observe une évaporation beaucoup plus prompte sur ce dernier, laquelle n'est pas accompagnée d'un refroidissement, mais bien d'une augmentation sensible de chaleur. Du reste, on a des exemples de chute de grêle pendant la nuit ; M. Bellani a cité un orage qui eut lieu au mois de juillet 1806, avant le lever du soleil, et pendant lequel il tomba une grande quantité de grêle, quoique l'on n'eût aperçu la veille aucun indice d'orage dans l'étendue de l'horizon. Ces hypothèses sont donc inadmissibles.

Peltier a modifié comme il suit la théorie de Volta. Quand deux nuages chargés d'électricité différente sont placés l'un au-dessus de l'autre, l'attraction est alors considérable ; les nuages se rapprochent sans décharge notable d'électricité, seulement il y a des actions par influence analogues à celles qui ont lieu entre les corps rugueux ou couverts d'aspérités. Cet échange d'électricité ne peut s'opérer sans produire une vaporisation de l'eau, d'où résulte un abaissement de température qui est d'autant plus prompt que la tension électrique est plus considérable. Quand la température des nuages est assez élevée, il n'y a aucun effet particulier ; mais si l'un d'eux est à une température près de zéro, l'abaissement de température pourra produire la congélation des portions

non vaporisées, qui se transforment alors en flocons de neige. Chaque flocon, chaque parcelle de neige, chargé d'électricité et d'humidité prise au premier nuage, est attiré par le second et emporté par lui. Pendant cette excursion, il y a perte d'électricité par rayonnement, puis évaporation d'une partie de la couche humide, d'où résulte un abaissement de température et par suite solidification de la portion restée liquide autour du globe neigeux. La tension électrique étant diminuée par cette influence, le globule est moins attiré, tombe dans le premier nuage, s'y recharge, s'y mouille, ainsi de suite jusqu'à ce que les grêlons aient acquis assez de densité pour tomber vers la terre. Suivant cette hypothèse, le bruit qui accompagne le phénomène de la grêle n'est pas dû au choc des grêlons, mais aux décharges électriques; le choc seulement pourrait l'augmenter. Le rayonnement électrique, ainsi que l'évaporation de l'humidité des grêlons, contribue à donner des formes anguleuses aux grains. Il faut donc, pour qu'il y ait formation de grêle, deux nuages chargés d'électricités contraires dont les particules vésiculaires possèdent une grande tension électrique et ne cèdent que lentement leur électricité à la périphérie. La température ne doit pas être de beaucoup supérieure à zéro, et les échanges électriques doivent produire une rapide évaporation. Cette théorie rentre dans celle de Volta, sauf la cause du refroidissement des nuages; les mêmes objections s'y appliquent.

M. Kaemtz pense que la formation de la grêle tient simplement à la basse température des hautes régions, où les particules d'eau se solidifient. Il admet que, lors du grand échauffement du sol, les colonnes ascendantes humides viennent se condenser dans les régions élevées en petits cristaux de neige; à mesure que cette couche de cirrus devient plus dense, quelquefois des cumulus se forment. Si les particules neigeuses emportées par les vents traversent des espaces humides, alors elles s'accroissent et forment du grésil; ensuite leur chute dans les parties basses dépend de la constitution du reste de l'at-

mosphère. Si les grêlons sont petits, et que la température des régions supérieures soit encore élevée, les grêlons peuvent fondre pendant leur chute; toutes les gouttes de pluie qui en résultent condensent à leur surface une grande quantité de vapeur d'eau : de là ces gouttes larges de pluie qui précèdent les orages et qui tombent par petites averses comme la grêle. La température est-elle très-basse, si les grêlons sont chassés horizontalement, il se précipite sans cesse à leur surface une nouvelle quantité d'eau, et leur volume s'accroît.

Le décroîssement rapide de la température est donc, suivant M. Kaemtz, la principale condition de formation de la grêle. Cependant, suivant cette manière de voir, on ne conçoit pas pourquoi les chutes de grêle s'étendent sur un espace fort long et très-peu large, comme dans l'orage de 1788. C'est, du reste, ce que l'on n'a pu encore expliquer.

Il résulte de ce qui précède, que l'on n'a pas d'explication satisfaisante du phénomène de la grêle, et qu'il est nécessaire que les physiciens recueillent de nombreuses observations pour en interpréter toutes les phases.

SECTION V.

DE L'ORIGINE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Nous avons vu que l'intensité de l'électricité positive de l'atmosphère va en augmentant à mesure que l'on s'élève au-dessus de la surface de la terre, et que, au contraire, lorsqu'on cherche à reconnaître l'électricité inhérente au globe, on a des signes d'électricité négative; d'après cela, l'on peut concevoir que la terre et l'atmosphère sont constituées dans deux états électriques différents, ou bien que la terre et l'atmosphère sont toutes deux électrisées de la même manière mais avec des tensions différentes. Dans le premier cas, les effets observés s'expliquent facilement; dans le second, l'électrisation peut être positive ou négative : si elle est positive, la

tension doit aller en croissant depuis la terre à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère ; si elle est négative, elle doit aller au contraire en diminuant; les effets d'influence dans ces deux suppositions peuvent rendre compte des effets produits. Nous devons dire cependant que les probabilités sont en faveur de la première hypothèse, c'est-à-dire de l'électrisation positive de l'atmosphère et négative du sol. Mais il se présente ici une question : quelle que soit la distribution de l'électricité, pourquoi une telle répartition a-t-elle lieu? quelle est la cause de l'électricité atmosphérique?

L'évaporation étant le changement d'état le plus manifeste qui s'opère sous nos yeux et qui se produise sur toute la surface du globe, nous sommes amenés à examiner si, dans ce changement moléculaire, il n'y aurait pas des effets électriques de produits. Il est constaté aujourd'hui que l'évaporation pure et simple de l'eau dans des vases de métal non attaquable, ne produit pas d'électricité; mais il y en a toutes les fois qu'il s'opère une réaction chimique ou que le composé tenu en solution se déshydrate. Si l'on verse, par exemple, quelques gouttes d'eau salée sur le fond d'une capsule plate en platine chauffée au rouge, en relation avec un électroscope très-sensible, et que l'on attende que la température soit descendue entre 140° et 110°, aussitôt que les particules de la goutte saturée commencent à toucher le métal, la vapeur s'y forme à une température très-élevée; peu à peu il se produit une suite d'explosions, et l'électroscope accuse la présence de l'électricité. Avant et après il y a absence d'effets électriques ; il en est de même quand la goutte d'eau mouille la capsule. L'effet électrique est donc produit à l'instant de la déshydratation, c'est-à-dire au moment où l'eau cesse de faire partie d'une combinaison ; mais afin que le phénomène ait lieu, il faut que la vapeur ait une température assez élevée pour que l'eau puisse se séparer rapidement de la base sans toucher à la paroi du vase; c'est pour ce motif que l'on n'obtient aucun effet à une température inférieure à 110°.

On doit conclure de là, que dans l'évaporation pure et simple de l'eau à la surface de la terre, il n'y a pas d'électricité dégagée. Celle que la vapeur accuse près des jets d'eau et des cascades et qui est négative, est due probablement à l'électricité de la terre, ou bien est un effet d'influence analogue à celui qui se produit quand un corps conducteur s'élève ou s'abaisse. (Voyez p. 465 et suivantes.)

On a indiqué comme cause fournissant de l'électricité aux vapeurs, et par suite à l'air, les réactions chimiques sans nombre qui ont lieu dans l'intérieur des corps organisés; mais ces réactions s'opérant dans des directions très-différentes, et les gaz qui s'échappent touchant continuellement les surfaces et les parties intérieures de ces corps, il est certain que les quantités d'électricité qui ne se recomposent pas doivent être excessivement faibles.

On doit donc chercher ailleurs que dans les réactions qui ont lieu sur le globe la cause de l'électricité atmosphérique. L'hypothèse la plus simple que l'on puisse faire est de supposer que la distribution de la chaleur dans l'atmosphère et dans la terre soit seule cause des effets produits, et que l'inégale température des couches de matière depuis la surface du globe jusqu'à la limite de l'atmosphère, et même depuis le centre de la terre jusqu'aux dernières couches matérielles gazeuses, maintienne en dehors des variations accidentelles, l'équilibre de l'électricité atmosphérique; les considérations suivantes vont servir à développer cette théorie.

Les expériences que l'un de nous a faites et dont les premiers résultats sont consignés dans les *Annales de physique et de chimie* (1829, t. XLI, p. 353, *Mémoire de M. Becquerel*), ont mis en évidence ce principe que l'inégale propagation de la chaleur dans un métal homogène suffit pour séparer les électricités; les portions qui s'échauffent le plus prennent l'électricité négative et celles qui s'échauffent le moins l'électricité positive; ainsi, par exemple, si dans un fil métallique homogène d'or ou de

platine on fait un nœud et que l'on chauffe le fil à droite ou à gauche du nœud, alors le nœud étant moins échauffé que la partie voisine exposée à l'action du foyer, il se produira un courant électrique dans une direction telle, que la partie la plus échauffée prendra l'électricité négative, et la partie la moins chaude la positive. On peut rendre l'effet plus sensible en prenant un fil ou une barre métallique d'or ou de platine de forme conique, telle que AB (pl. II, fig. 7); alors, en chauffant un point C à l'aide d'une lampe à alcool ou d'un foyer quelconque, l'échauffement est inégal des deux côtés, et la distribution électrique se fait de la même manière que précédemment, de telle sorte qu'en attachant les bouts A et B aux extrémités d'un galvanomètre, on a un courant allant de A vers B en passant par l'appareil mesureur D. Il résulte donc de là que dans l'inégal échauffement de deux parties contiguës d'une même substance, il y a développement d'électricité, tel que la partie la plus échauffée se constitue dans un état de tension négatif et la partie la moins échauffée dans un état de tension positif.

L'atmosphère se trouve précisément dans le même cas que les substances et les fils métalliques dont nous venons de parler. La température des couches d'air, surtout dans les régions tropicales, va en diminuant rapidement depuis la surface de la terre jusqu'aux limites de l'atmosphère : la température moyenne étant 27°,5 à la surface de la terre, dans ces régions, la température des dernières couches atmosphériques est au moins — 60°; dans les régions tempérées, cette différence est moins considérable. Les parties supérieures de l'atmosphère doivent donc être positives, et les régions les plus inférieures, ou le sol, négatif. Peut-être dans le globe des effets analogues ont-ils lieu et rendent-ils le centre de la terre négatif, et par suite plus positives les régions élevées de l'atmosphère.

Si des observations ultérieures confirment cette manière de voir, et prouvent que la distribution inégale de

la chaleur dans l'atmosphère est la seule cause de l'électricité atmosphérique, alors on pourrait peut-être prévoir comment les régions polaires, où les différences de température sont moins considérables, servent de point de réunion aux électricités dégagées sur le reste de la terre, et donnent naissance aux lueurs que nous décrirons plus loin, qui sont influencées par l'axe magnétique terrestre et qui sont connues sous le nom d'aurore boréale. Il serait bien remarquable que la distribution inégale de la chaleur fût la cause des effets électriques, des effets magnétiques terrestres, et de l'aurore boréale.



CHAPITRE VII.

DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

SECTION Ire.

DE L'ACTION MAGNÉTIQUE DU GLOBE.

§ I. — *Des éléments nécessaires à la détermination de l'action magnétique du globe dans les différents lieux de la terre; déclinaison, inclinaison, intensité.*

Lorsqu'une aiguille aimantée, suspendue horizontalement par un fil sans torsion, ou posée sur un pivot et libre de se mouvoir dans un plan horizontal, est abandonnée à elle-même, elle ne reste pas en équilibre dans toutes les positions, et se fixe, après quelques oscillations, dans une direction qui est à peu près celle du nord au sud. Si on la dérange de cette position d'équilibre, elle y revient en effectuant des oscillations à droite et à gauche. L'angle que forme l'aiguille ainsi en équilibre avec le méridien du lieu, est la *déclinaison* de ce lieu.

Si l'aiguille aimantée est suspendue par son centre de gravité, et ne peut se mouvoir que dans un plan vertical passant par la direction de l'aiguille horizontale, elle ne conserve plus son horizontalité, lors même que les deux moitiés ont été parfaitement équilibrées avant l'aimantation; elle s'incline par rapport à l'horizon d'un angle qui diminue en allant de chaque pôle à l'équateur, où il est nul dans des zones qui s'en écartent peu. De l'équateur au pôle nord, l'extrémité de l'ai-

guille dirigée vers ce point s'abaisse de plus en plus au-dessous de l'horizon; c'est l'inverse dans l'hémisphère sud. L'angle formé par la direction de l'aiguille ainsi suspendue et l'horizontale du lieu est l'*inclinaison*. On mesure la déclinaison et l'inclinaison au moyen d'appareils que l'on nomme boussoles.

Cette direction de l'aiguille aimantée dans tous les lieux de la terre révèle une force magnétique inhérente au globe terrestre, sur la nature de laquelle nous donnerons quelques indications à la fin de ce chapitre; mais avant tout, il est nécessaire de faire connaître comment la direction de l'aiguille est liée avec la position géographique des localités, quelles sont ses variations, et par conséquent quels sont les changements auxquels sont assujetties la déclinaison et l'inclinaison.

Il est un autre élément dont la valeur entre dans l'expression de l'action magnétique terrestre : nous voulons parler de l'intensité.

Considérons un instant l'aiguille horizontale dans sa position d'équilibre: si on l'en écarte d'un petit nombre de degrés, elle y revient en effectuant des oscillations isochrones dont la vitesse dépend de son magnétisme propre et de l'intensité des forces magnétiques terrestres dans le lieu de l'observation, l'influence de la terre se manifestant d'une manière égale et contraire aux deux pôles de l'aiguille, et se résumant ainsi en une action de direction. Or, si cette aiguille conserve constamment son magnétisme et qu'on la transporte en différents points du globe, le nombre d'oscillations qu'elle effectuera dans le même temps pourra servir à mesurer l'intensité des forces magnétiques horizontales en ces différents points, puisque cette aiguille oscille sous l'influence des forces magnétiques terrestres, comme un pendule sous l'action de la pesanteur. Si l'on a déterminé ainsi l'intensité de la composante horizontale, connaissant la direction de la force, on déterminera l'intensité totale. La formule du pendule servira donc à comparer l'*intensité* du magnétisme terrestre des divers lieux de la terre.

On a cherché à calculer la valeur de l'intensité absolue de cette résultante en un point déterminé, afin de vérifier à une époque quelconque, si elle éprouvait ou non des changements. On a dû songer à une autre méthode que la précédente qui ne donne que des mesures relatives. D'ailleurs, il est impossible de construire des aiguilles parfaitement identiques et comparables.

Poisson a proposé, pour résoudre cette question, une méthode indirecte exigeant l'emploi d'aiguilles seulement identiques dans leur constitution, mais indépendantes du degré de l'aimantation qu'on leur donne. Il suffit de faire osciller séparément deux aiguilles d'acier aimantées à saturation; on place ensuite les centres de gravité des deux aiguilles sur une même ligne droite, parallèle à la force directrice du globe: ces deux aiguilles se dirigent suivant cette ligne; puis on fait osciller successivement chacune d'elles sous les actions réunies de la terre et de l'aiguille aimantée en repos, en déterminant également la durée de chacune des nouvelles oscillations. Enfin, on mesure la distance des centres de gravité de ces deux aiguilles, et leurs moments d'inertie rapportés à leur axe de rotation passant par ces mêmes points. Les résultats fournis par toutes ces expériences suffisent pour calculer la valeur de l'intensité magnétique à une époque déterminée.

M. Gauss a réalisé cette méthode, qui n'avait été qu'indiquée par Poisson; il a déterminé l'intensité absolue du magnétisme terrestre à l'aide d'appareils nommés *magnétomètres*, qui sont maintenant généralement employés. (Voyez Becquerel, *Traité du magnétisme*, p. 73 et suivantes.)

Influence de la température et des masses de fer sur le magnétisme des aiguilles. — Les variations de température, dans une aiguille, altérant son magnétisme, il est indispensable, quand on observe en différents points du globe, d'évaluer les effets de ces variations.

Coulomb, dans une série d'expériences faites avec soin, a démontré que l'intensité magnétique d'un bar-

reau diminue à mesure que l'on élève la température et reprend sa valeur première quand on revient à la température primitive, pourvu que l'on n'ait pas dépassé certaines limites. Or, comme les voyageurs en parcourant les diverses régions de la terre observent dans des localités présentant des différences de température entre -20° et $+30^\circ$, on doit en conclure que les aiguilles aimantées employées éprouvent des changements dans leur magnétisme : dès-lors les résultats ne sont plus immédiatement comparables.

Il est facile, par des expériences préliminaires, d'avoir égard à cette cause d'erreur. La plupart des physiciens, pour comparer les temps des oscillations d'une aiguille aimantée à deux températures déterminées, se servent de la formule suivante :

$$n = n' [1 - c(t' - t)].$$

n et n' sont les nombres d'oscillations exécutées pendant l'unité de temps aux températures t et t', et c une constante que l'on détermine pour chaque aiguille. D'après cela, on peut connaître le temps d'une oscillation lorsque l'aiguille est ramenée à la température zéro, et éliminer dans le calcul de l'intensité magnétique la cause d'erreur résultant des variations de température.

Les observations magnétiques sur mer exigent des précautions à prendre, en raison des masses considérables de fer qui se trouvent à bord des vaisseaux. Deux boussoles, aussi identiques que possible, placées en différents points d'un navire, ne donnent jamais les mêmes indications.

M. Barlow a donné une méthode à l'aide de laquelle on peut se préserver de cette cause perturbatrice en s'appuyant sur le principe suivant : tous les fers d'un vaisseau, acquérant, sous l'influence terrestre, la polarité magnétique, agissent comme de véritables aimants ; on en détruit l'action avec une plaque de fer doux dont on fait varier la distance et l'élévation par rapport à la

boussole, de manière à produire la même action, mais en sens inverse de celle qui est exercée par les pièces de fer se trouvant sur le bâtiment.

M. le capitaine Duperrey prit les dispositions suivantes pour préserver les boussoles de l'attraction locale, pendant son voyage de circumnavigation de 1822 à 1825. Lors de l'armement de la corvette *la Coquille*, dont il avait reçu le commandement, les canons du gaillard d'arrière avaient été supprimés et l'on avait chevillé et cloué en cuivre tout ce qui entourait le lieu des observations magnétiques, jusqu'à une distance de trois ou quatre mètres. Diverses expériences prouvèrent qu'au moyen de ces dispositions, l'on pouvait négliger l'influence des fers sur l'aiguille aimantée; néanmoins, les inclinaisons observées à bord ont toujours été un peu plus grandes que les véritables dans l'hémisphère magnétique boréal, et plus petites au contraire dans l'hémisphère magnétique austral.

§ II. — *De la déclinaison en divers points du globe.*

La déclinaison de l'aiguille aimantée est soumise dans un même lieu à des variations diurnes, annuelles, et séculaires, que l'on peut considérer comme régulières, et à des variations irrégulières qui se montrent dans certaines circonstances atmosphériques, telles qu'aurores boréales, éruptions volcaniques et autres causes échappant à l'observation. Ces variations pouvant nous éclairer sur la cause du magnétisme terrestre, il est nécessaire d'entrer dans quelques détails à cet égard.

Variations diurnes. — Dans nos climats, l'extrémité nord de l'aiguille aimantée marche tous les jours de l'est à l'ouest, depuis le lever du soleil jusque vers 1 heure de l'après-midi, comme si cette extrémité fuyait l'influenec de l'astre qui s'élève sur l'horizon ; elle retourne ensuite vers l'est par un mouvement rétrograde, de manière à reprendre à très-peu près, vers 10 heures du soir, la position qu'elle occupait le matin. Pendant la nuit, l'ai-

guille ne présente que peu de variations, mais on observe cependant l'apparence d'un second mouvement vers l'ouest : on peut dire néanmoins qu'elle est presque stationnaire; le lendemain matin, elle recommence son excursion.

A Paris, l'amplitude moyenne de la variation diurne est pour avril, mai, juin, juillet et septembre, de 13 à 15 minutes de degré, et, pour les autres mois, de 8 à 10′; il y a des jours où elle s'élève à 25′, et d'autres où elle ne dépasse pas 5 ou 6′.

Le maximum de déviation n'a pas lieu à la même heure sur les différents points du globe. Suivant M. Dove, le maximum de déviation orientale a lieu à 8 heures du matin, à Freyberg, Nicolaïef et Saint-Pétersbourg, à 9 heures à Cazan; le maximum de la déviation occidentale, à 2 heures après midi, à Cazan, Nicolaïeff, Saint-Pétersbourg, et à 1 heure, à Freyberg.

En Danemark, en Islande, ainsi que dans les régions septentrionales, les excursions diurnes de l'aiguille aimantée sont plus étendues, aussi régulières, et ne s'arrêtent pas pendant la nuit. On en a conclu que les variations diurnes augmentent en allant de nos climats vers le nord, et diminuent jusqu'à l'équateur, où elles sont très-faibles.

La commission scientifique française envoyée dans le nord pendant l'hiver de 1838 à 1839, a déduit de trois séries d'observations les conséquences suivantes :

Dans la première série, du 20 septembre au 9 octobre, on a trouvé que l'aiguille est restée à peu près stationnaire de 11 heures du soir à 7^h 1/2 du matin; alors elle a commencé à marcher vers l'ouest jusqu'à 1^h 1/2, où elle a atteint son maximum d'écartement, puis elle a rétrogradé vers l'est jusqu'à 11 heures du soir, mais en reprenant une position qui n'est jamais la même que celle de la veille. L'amplitude de cette variation a été d'environ 15′. Pendant la durée de cette période, il y a eu huit aurores boréales; mais, en calculant l'amplitude

moyenne, on a rejeté les observations relatives à cette influence.

Dans la deuxième série, du 19 novembre au 8 janvier, le soleil ne s'est pas levé et est resté au-dessous de l'horizon; l'aiguille n'a jamais été stationnaire. Depuis 1 heure du matin jusqu'à midi, la pointe nord déclinait vers l'ouest, mais l'amplitude était si faible qu'on ne pouvait déterminer avec exactitude l'instant précis du maximum. A 3 heures, elle reprenait sa marche vers l'est jusque vers 1 heure du matin. Le maximum d'amplitude a été de 5 à 6′ au lieu de 15′, comme dans la première série.

Dans la troisième série, du 16 mars au 5 avril, il y a eu quatorze aurores boréales qui ont troublé presque constamment la marche de l'aiguille. Le minimum de déclinaison a eu lieu entre 6 et 8 heures du matin, le maximum vers 1^h 1/2 du soir; l'amplitude de la variation diurne a été de 15 à 16′. Ces résultats, ayant une grande analogie avec ceux de la première série, semblent annoncer que le retour du soleil a dû exercer une influence sur les phénomènes.

Ces observations montrent que, pendant la nuit, l'aiguille est plus agitée que dans nos contrées, et que l'amplitude des oscillations n'est pas aussi étendue qu'on l'avait d'abord annoncé, puisqu'elle n'a pas excédé 15 à 16′, amplitude qui est souvent dépassée dans nos climats.

Les observations faites de 1794 à 1796 par John Macdonal, au fort Marlborough de Sumatra et à l'île Sainte-Hélène, conduisent à ces deux conséquences importantes : l'une, que les variations diurnes entre les tropiques ont sensiblement moins d'étendue qu'en Europe; l'autre, qu'aux mêmes heures où, dans l'hémisphère boréal, l'extrémité de l'aiguille qui regarde le nord marche à l'ouest, le mouvement dans l'hémisphère austral s'exécute en sens contraire; entre les deux hémisphères il doit donc se trouver des points où les variations diurnes sont nulles. Ainsi il existe dans les en-

virons de l'équateur une ligne sans variations diurnes.

Les observations beaucoup plus récentes de MM. de Freycinet et Duperrey confirment la première de ces assertions, bien qu'il soit vrai de dire qu'il ne paraît pas y avoir de relations entre les amplitudes de l'aiguille et les latitudes des stations. Quant à la seconde assertion, elle est généralement confirmée par les observations qui ont été faites dans les régions équatoriales et dans une partie de la zone intertropicale; mais tout porte à croire que la limite des variations diurnes, ou la ligne sans variations, ne coïncide ni avec la ligne équinoxiale, ni même avec la ligne sans inclinaison.

Il paraît qu'en Amérique, au Chili et au Pérou, l'aiguille éprouve un temps d'arrêt et une double oscillation bien manifeste : le matin elle marche à l'est, dans le milieu de la journée elle rétrograde vers l'ouest, puis, dans la soirée, en partant de 3 ou 4 heures de l'après-midi, elle reprend son mouvement vers l'est pour revenir à l'ouest, et recommence le lendemain matin, au soleil levant, à marcher vers l'est. (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. II, page 330.)

Variations annuelles. — Les variations annuelles ont été signalées pour la première fois par Cassini. Elles paraissent se rattacher à la position du soleil, à l'époque des équinoxes et des solstices, comme on en juge par les conséquences auxquelles elles conduisent. (*Annales de physique et de chimie*, t. XVI, p. 44 et suivantes.)

Dans l'intervalle du mois de janvier au mois d'avril, l'aiguille aimantée s'éloigne du pôle nord, en sorte que la déclinaison occidentale augmente. A partir du mois d'avril, et jusqu'au commencement de juillet, c'est-à-dire durant tout le temps qui s'écoule entre l'équinoxe de printemps et le solstice d'été, la déclinaison diminue. Après le solstice d'été et jusqu'à l'équinoxe du printemps suivant, l'aiguille reprend son chemin vers l'ouest, de manière qu'en octobre elle se trouve, à fort peu près, dans la même direction qu'en mai; entre octobre et mars,

le mouvement occidental est plus petit que dans les trois mois précédents.

Il résulte de là que, pendant les trois mois qui s'écoulent entre l'équinoxe du printemps et le solstice d'été, l'aiguille rétrograde vers l'est, et que, dans les neuf mois suivants, sa marche générale, au contraire, se dirige vers l'ouest; il y a donc un maximum de déclinaison vers l'équinoxe du printemps, et un minimum au solstice d'été.

Pour donner une idée de l'étendue des variations à Paris, nous rapporterons les nombres qui expriment les variations de la déclinaison pendant les douze mois de l'année 1784.

MOIS.		MOIS.	
Janvier........	— 4′ 29″	Juillet..........	— 2′ 31″
Février.........	— 4 53	Août............	— 0 58
Mars............	+ 2 53	Septembre......	+ 3 13
Avril............	+ 3 39	Octobre........	+ 9 58
Mai.............	+ 2 39	Novembre......	+ 12 18
Juin............	— 2 59	Décembre......	+ 13 54

Les signes — indiquent que l'index de l'aiguille des variations était à droite du zéro de la division. L'amplitude totale dans le courant de cette année a donc été au maximum de près de 20′.

M. Arago, en comparant les observations de Cassini à l'époque de 1786, avec celles de 1800 correspondantes aux mesures de Gilpin à Londres, a reconnu qu'elles ne différaient, sous le rapport du magnétisme, qu'en un seul point les unes des autres: en 1786, le changement annuel de la déclinaison était de 9′, tandis qu'en 1800 il était à peine de 1′. Le mouvement rétrograde qu'éprouve l'aiguille, entre l'équinoxe du printemps et le solstice d'été, s'est donc affaibli en même

temps que le mouvement général et annuel vers l'occident.

M. Arago a donné dans le même travail le tableau des déclinaisons moyennes, déterminées en 1810 par Bowditch, à Salem aux États-Unis. Dans cette localité, la déclinaison est occidentale, et diminue graduellement, depuis un grand nombre d'années, d'environ 2' par an. En examinant ces résultats, on n'y trouve aucune trace de la période indiquée par Cassini; car la déclinaison n'a pas diminué entre l'équinoxe du printemps et le solstice d'été : elle a augmenté, au contraire, graduellement, depuis avril jusqu'en août. Par compensation, elle a diminué sensiblement entre septembre et décembre. Il pourrait donc se faire que la période de Cassini se fût transportée du printemps en automne. Si cette conjecture se confirmait, les oscillations seraient réglées par les principes suivants:

« 1° Quand l'aiguille, la déclinaison étant occidentale, « s'éloigne du méridien, elle éprouve un mouvement « rétrograde qui la rapproche de ce plan. C'est la dé« couverte de Cassini.

« 2° Cette oscillation rétrograde est d'autant plus « étendue que le changement annuel de déclinaison est « plus grand. Cette conséquence résulte de la compa« raison des observations de Cassini avec celles de « Gilpin.

« 3° L'oscillation disparaît, et tous les mois donnent « à peu près la même déclinaison moyenne, quand l'ai« guille étant parvenue à la limite de son excursion occi« dentale, le changement annuel de déclinaison est nul. « Cela résulte des observations de M. Beaufoy.

« 4° Enfin, lorsque la déclinaison occidentale diminue « d'année en année, on n'observe plus d'oscillations re« marquables de l'aiguille vers l'est qu'entre les mois « de septembre et de décembre. » On déduit cette conséquence des observations de Bowditch.

Variations séculaires. — Non-seulement l'aiguille de déclinaison est soumise, dans un même lieu, à des va-

riations mensuelles, mais encore à des variations annuelles et séculaires. Pour montrer comment peut varier la déclinaison, nous raporterons les valeurs de la déclinaison à Paris depuis 1580.

DÉCLINAISON ABSOLUE A PARIS.

Années.	Déclinaison.	Années.	Déclinaison.
1580........	11°30′ E.	1816........	22°25′ O.
1618........	8 00	1817........	22 19
1663........	0 00	1823........	22 23
1678........	1 30 O.	1824........	22 23
1700........	8 10	1825........	22 22
1780........	19 55	1827........	22 20
1785........	22 00	1828........	22 05
1805........	22 05	1829........	22 12
1813........	22 28	1832........	22 03
1814........	22 34	1835........	22 04

On voit que depuis 1580 la déclinaison a varié de plus de 30° à Paris; à cette époque, l'extrémité nord de l'aiguille deviait à l'est; en 1663 l'aiguille se trouvait dans le méridien terrestre; depuis lors la déclinaison est devenue occidentale; en 1814, elle avait atteint son maximum de 22° 34′, et ensuite elle a toujours diminué.

En comparant les observations faites à Paris et à Londres, on trouve que les deux maxima ont eu lieu à l'est et à l'ouest sensiblement aux mêmes époques dans ces deux capitales.

Des variations irrégulières. — Bien que les variations de l'aiguille aimantée soient soumises, dans nos contrées, à un mouvement régulier de l'est à l'ouest, cependant on ne trouve pas deux jours de l'année qui se ressemblent parfaitement; l'aiguille aimantée n'exécute pas sa marche d'une manière parfaitement uniforme. Il y a des variations irrégulières que la méthode de MM. Gauss et Weber met surtout en évidence, et qui probablement tiennent en partie à une inégale distribution de la température sur la terre; elles sont donc soumises à autant d'irrégularités que les variations ba-

rométriques et les vents. On peut s'en convaincre en jetant les yeux sur les courbes qui représentent l'amplitude de la déclinaison à tous les instants de la journée, et que l'on trouve dans tous les annuaires météorologiques publiés jusqu'ici. Mais, parmi ces perturbations, celle qui a le plus d'influence est sans contredit l'aurore boréale.

De nombreuses recherches ont démontré que les aurores polaires troublent la marche de l'aiguille aimantée, non-seulement lorsqu'elles sont visibles dans le lieu de l'observation, mais encore lorsqu'elles sont au-dessous de l'horizon, et que l'on n'en a connaissance que d'après les relations des voyageurs. A Paris, suivant les recherches faites à l'Observatoire, les variations diurnes sont tantôt plus petites de 9' à 10', tantôt plus grandes de 20' que dans les conditions habituelles.

La commission scientifique dans le Nord a observé que lorsque les aurores consistent en vapeur diffuse, disposée en arcs ou en plaques éparses, la perturbation de l'aiguille aimantée est généralement faible et souvent nulle; mais lorsque les arcs rayonnants ou les faisceaux de lumière deviennent vifs et colorés, l'action se fait sentir de 1 à 3 minutes de temps après leur apparition, et il est difficile alors de suivre les grandes oscillations de l'aiguille, qui souvent sont de plusieurs degrés. Les plus grands écarts ont lieu lorsque se forment les couronnes boréales dont les rayons effacent l'éclat des étoiles de première grandeur et sont colorés de rouge et de vert.

En général, la déclinaison augmente avant l'aurore, et souvent même jusqu'à ce que le phénomène ait atteint un certain degré d'intensité; alors les grandes oscillations commencent, puis l'aiguille revient vers l'est très-régulièrement, elle dépasse la position normale qu'elle ne reprend que quelques heures après, si une nouvelle aurore ne vient pas troubler sa marche. Il arrive même que l'aiguille prédit l'aurore pour ainsi dire par sa marche anomale vers l'ouest pendant toute la journée.

Les éruptions volcaniques paraissent influencer l'aiguille aimantée, mais il ne semble pas que les tremblements de terre agissent autrement que par des mouvements mécaniques qu'ils lui impriment. Quant aux orages ou pour mieux dire aux coups de tonnerre, on sait qu'ils peuvent changer ou renverser même le magnétisme des aiguilles.

Des méridiens magnétiques.

Les voyageurs et les navigateurs qui ont parcouru les diverses parties du globe depuis près de deux siècles, ont recueilli un grand nombre d'observations relatives à la déclinaison de l'aiguille aimantée. Les premiers qui observèrent à bord ayant négligé l'action locale, obtinrent des résultats qui sont nécessairement entachés d'erreurs, aussi les anciennes observations n'ont-elles pas une grande valeur; il n'en est plus de même depuis près de trente ans. On trouvera dans le *Traité du magnétisme*, de M. Becquerel, p. 213, un tableau des déclinaisons de l'aiguille aimantée, pour les différents lieux de la terre.

Halley est le premier qui ait essayé de réunir et de coordonner ensemble le grand nombre d'observations de déclinaison faites jusqu'à lui. En 1700, il publia une carte sur laquelle sont tracées les lignes d'égale déclinaison de 5 en 5°. Cette carte, à l'époque où elle parut, fit sensation, parce qu'elle permettait de saisir d'un seul coup d'œil la marche de la déclinaison, depuis l'équateur jusqu'aux parties les plus septentrionales où les voyageurs étaient parvenus. Des changements étant survenus dans la déclinaison, et les méthodes d'observation ayant été perfectionnées, on sentit de jour en jour combien les indications de la carte de Halley devenaient défectueuses. En 1745 et 1746, Mountain et Dodson, ayant eu à leur disposition les registres de l'amirauté anglaise et les mémoires de plusieurs officiers de marine, publièrent une nouvelle carte de déclinaison. Churchman fit paraître, en 1794, un atlas magnétique,

dans lequel il essaya de donner les lois de la déclinaison, en s'appuyant sur l'existence de deux pôles magnétiques, dont l'un était placé, pour 1800, sous la latitude de 58° nord, et sous la longitude de 134° ouest de Greenvich, très-près du cap Fairweather, et l'autre sous la latitude de 58° sud, et sous la longitude de 165°. Churchman avança, en outre, que le pôle nord effectuait sa révolution en 1096 ans, et le pôle sud en 2289. Cet ouvrage avait été précédé d'un autre plus remarquable, qui parut en 1787, et dans lequel son auteur, M. Hansteen, donna le tableau le plus complet qu'on ait encore eu avant cette époque des observations de déclinaison. Cet ouvrage était accompagné d'un atlas magnétique où se trouvaient toutes les lignes d'égale déclinaison; le défaut de symétrie de ces lignes était tel qu'on dut en conclure que les causes d'où dépend le magnétisme terrestre sont réparties irrégulièrement sur la surface du globe. M. Barlow a publié aussi des lignes d'égale déclinaison.

Ces lignes ne peuvent réellement avoir d'autre importance que de grouper d'une manière méthodique les observations faites à une époque déterminée, surtout depuis que M. Duperrey a trouvé un moyen graphique à l'aide duquel il a tracé la véritable figure des méridiens magnétiques tels qu'ils doivent être considérés dans l'état actuel de nos connaissances sur le magnétisme terrestre.

On appelle méridien magnétique d'un lieu le plan vertical passant par la direction de l'aiguille aimantée dans cette localité. Supposons que l'on parte d'un point quelconque de la surface du globe, et que cheminant toujours dans le sens de la direction de l'aiguille aimantée, d'abord vers le pôle nord, ensuite vers le pôle sud, on relève tous les points par lesquels on aura passé; la ligne courbe qui les réunira tous formera un méridien magnétique. Si l'on prend un autre point de départ voisin du premier, et que l'on trace, de la même manière, un méridien magnétique, ce méridien rencontrera le premier en deux

points situés, l'un vers le pôle nord, l'autre vers le pôle sud. En traçant sur le globe un certain nombre de ces méridiens, et prenant les points d'intersection des méridiens voisins, on aura alors dans chaque hémisphère une courbe fermée résultant de la réunion de tous les points d'intersection. Il est naturel d'admettre que le pôle magnétique de chaque hémisphère se trouvera au centre de l'aire renfermée par ces courbes. Ces pôles, qui sont les points où l'aiguille d'inclinaison est verticale, ne doivent pas être confondus avec les centres d'action intérieurs qui sont les véritables centres des forces magnétiques de la terre.

Les courbes perpendiculaires aux méridiens magnétiques sont les parallèles magnétiques; on les a appelées ainsi en raison de leur analogie avec les parallèles terrestres qui sont perpendiculaires aux méridiens terrestres.

On trouvera, pl. VIII et IX, les cartes des méridiens et des parallèles magnétiques publiées en 1836 par M. Duperrey, tels qu'ils résultent des observations de la déclinaison de l'aiguille aimantée. La planche VIII représente les lignes tracées sur une projection de Mercator, et la planche IX sur une projection polaire. La ligne marquée *équateur magnétique*, sur la carte-planche VIII, est la courbe perpendiculaire à tous les méridiens magnétiques passant par leur milieu et analogue à l'équateur terrestre qui est perpendiculaire à tous les méridiens géographiques. Mais le véritable équateur magnétique est représenté par une ligne ponctuée; c'est, comme nous le verrons ci-après, la ligne des points où l'inclinaison est nulle.

M. Duperrey avait déduit des méridiens que les deux pôles magnétiques étaient placés, l'un au nord de l'Amérique septentrionale par 70°10′ de latitude nord et 100° 40′ de longitude ouest; l'autre, au sud de la Nouvelle-Hollande, par 76° de latitude sud et 135° de longitude est. Cette dernière position fut fixée, en 1837, à 75° sud et 136° est, quand M. Duperrey put rap-

porter sur sa carte les nombreuses observations faites, en 1820, par les capitaines Bellingshausen et Lazare, dans toute l'étendue de la zone comprise entre les parallèles de 55° à 70° de latitude sud. En 1832, le capitaine Ross ayant trouvé que l'aiguille d'inclinaison était à 90° sur la carte de Boothia-Félix, par 70° 5' nord et 99° 12' ouest, c'est-à-dire 30 milles seulement à l'est de la position fixée par M. Duperrey, il s'ensuit que l'on ne saurait élever aucun doute sur la véritable position du pôle magnétique boréal.

M. Duperrey, dans une notice communiquée à l'Académie des sciences (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XIII, 13 déc. 1841), a cherché à démontrer qu'il en était de même à l'égard du pôle magnétique austral. Il s'est appuyé pour le prouver sur les observations faites par les capitaines d'Urville, Wilkes et J. Ross. Sans entrer dans le fond de la discussion de ces observations, nous dirons que celles du capitaine Ross placeraient ce pôle par 75° 6' sud, et 150° 50' est, les observations du capitaine Wilkes par 71° 55' sud et 141° 0' est; celles du capitaine d'Urville par 75° 20' sud et 130° 10' est. Cette dernière position s'accorde en latitude avec celle de M. Duperrey, et ne diffère que de 80 milles de l'est à l'ouest; on doit regarder par conséquent ces résultats comme sensiblement concomitants.

La planche X représente sur une même carte la position des deux pôles magnétiques, tels qu'ils résultent des observations de M. Duperrey.

§ III. — *De l'inclinaison en différents lieux du globe.*

Variation de l'inclinaison.—L'inclinaison, comme la déclinaison, est soumise à des variations diurnes, annuelles et séculaires, mais elles ont été moins bien étudiées, du moins les variations diurnes. Les variations mensuelles ont moins d'amplitude que celles de la déclinaison; l'inclinaison est à son maximum en été et à son minimum en hiver.

On peut, d'après le tableau suivant, qui donne l'inclinaison à Paris depuis 1671, avoir une idée de l'amplitude des variations annuelles.

Années.	Inclinaison.	Années.	Inclinaison.
1671	75° 0′	1818	68°35′
1754	72 15	1819	68 25
1776	72 25	1820	68 20
1780	71 48	1821	68 14
1791	70 52	1822	68 11
1798	69 51	1823	68 8
1806	69 12	1824	68 7
1810	68 50	1825	68 0
1814	68 36	1826	68 0
1816	68 40	1829	67 41
1817	68 38		

L'inclinaison, depuis 1671, a donc toujours été en diminuant. Les observations faites à Londres, depuis 1720, conduisent au même résultat. Si l'on compare les observations de 1778 et 1810 pour Paris, la diminution annuelle a été d'environ 5′, tandis que d'après celles de 1820 à 1825, elle s'est trouvée seulement de 3′,3. Les observations faites à Turin de 1806 à 1826 donnent 3′,5, et celles de Florence 3′,3.

L'inclinaison, de même que la déclinaison, éprouve des perturbations de la part de l'action des aurores boréales. Il résulte de l'ensemble des observations faites à Bossekop dans le nord, par la commission française, qu'en général au moment où l'aurore paraît, le pôle nord de l'aiguille semble attiré par l'aurore, et se relève un peu, et que l'inverse a lieu au milieu et vers la fin du météore.

Équateur magnétique.

Si l'on étudie la marche de l'inclinaison, en partant de nos latitudes et se rendant vers le nord, on trouve que l'extrémité nord de l'aiguille s'abaisse de plus en plus au-dessous de l'horizon, de sorte que l'inclinaison augmente en même temps que la latitude, et que dans les régions polaires, il existe des points où elle est voisine de 90°. En se dirigeant au contraire vers l'hémisphère austral, l'incli-

naison diminue avec la latitude, et il existe, non loin de l'équateur, des points où l'aiguille est sans inclinaison; au delà de ces points, l'inclinaison recommence, mais en sens inverse, et continue à augmenter jusque vers le pôle magnétique austral, où elle est de 90°. La courbe qui comprend tous les points où l'aiguille aimantée est sans inclinaison a été nommée équateur magnétique, et les points où l'aiguille est verticale, pôles magnétiques. On trouvera dans le *Traité du magnétisme* de M. Becquerel, p. 302 et suivantes, les principales observations d'inclinaison faites depuis 1798 jusqu'en 1829.

Wilke a donné, en 1768, le premier tracé de l'équateur magnétique. MM. Hansteen et Morlet l'ont reproduit, à des époques beaucoup plus récentes, en se fondant sur les nombreuses observations qu'ils ont puisées dans les voyages de Cook, d'Eckberg, de Panton, de la Pérouse, etc. On doit à M. Morlet un moyen facile de faire concourir à la détermination de cette courbe les observations voisines des lieux qu'elle parcourt en faisant usage d'une formule donnée par M. Biot et transformée en celle-ci par MM. Bowditch, Malveide et Kraff, $\text{tang}\ \lambda = \frac{\text{tang}\ i}{2}$, formule qui peut toujours être appliquée aux inclinaisons qui ne dépassent pas 30°; dans cette formule, λ représente la latitude magnétique du lieu d'observation, et i l'angle d'inclinaison; la latitude magnétique est comptée sur le méridien magnétique, et non sur le méridien terrestre. Les résultats obtenus par MM. Hansteen et Morlet se rapportent à l'équateur magnétique de 1780.

M. Duperrey, en discutant les observations magnétiques faites à bord de la corvette *la Coquille*, en a déduit la configuration de l'équateur magnétique, qu'il a coupé six fois. Il a prolongé cette courbe, tant au nord qu'au sud, dans des intervalles en longitude assez considérables. Ce navigateur s'est donc trouvé en position de faire le tracé de la ligne sans inclinaison avec une certaine exactitude.

Ayant obtenu, à l'aide de la formule précédente, les latitudes magnétiques des points où les observations ont été faites, il a déduit, de celles-ci et de la déclinaison de l'aiguille observée dans les mêmes lieux, les changements en longitude et en latitude qui, étant combinés avec la position géographique des stations, lui ont donné les coordonnées des points correspondants de l'équateur magnétique. Il a tracé, au moyen de cette méthode, en s'appuyant uniquement sur ses propres observations, la portion de cet équateur dans une étendue de 247° en longitude, laquelle comprend l'océan Atlantique, une partie du continent de l'Amérique méridionale, le grand océan Équinoxial, et l'archipel d'Asie jusqu'au méridien de la partie occidentale de l'île de Bornéo.

M. Duperrey a prolongé aussi vers l'orient la portion de la ligne sans inclinaison déduite de ses observations, en profitant de celles que le capitaine Edward Sabine a faites en 1822, dans l'île Santomé, golfe de Guinée. Quant au prolongement compris entre le méridien de la partie orientale de Bornéo et la pointe nord de Ceylan, il est le résultat des observations faites dans la campagne de la corvette *la Chevrette*, en 1827, par M. Jules de Blosseville.

Le capitaine Sabine a déterminé la position de l'un des deux nœuds de l'équateur magnétique qui se trouve par 3° 20′ à l'orient du méridien de Paris. M. Duperrey a montré qu'à partir de ce nœud, la ligne sans inclinaison remonte au nord en traversant le continent de l'Afrique, atteint probablement le 15ᵉ degré de latitude boréale dans la mer Rouge, à en juger du moins par une observation faite par Panton dans l'île Socotora en 1776, redescend ensuite un peu au sud, pour revenir rejoindre le point que M. de Blosseville a déterminé sur la pointe nord de Ceylan. Il paraîtrait, d'après cela, que l'équateur magnétique ne rencontrerait la ligne équinoxiale que dans deux points qui seraient presque diamétralement opposés, et situés, l'un dans l'océan

Atlantique, l'autre dans le Grand-Océan, à peu près dans le plan du méridien de Paris, et que là où cet équateur ne rencontrerait que quelques îles éparses, il ne s'éloignerait que bien peu de la ligne équinoxiale; qu'il s'en écarterait davantage lorsque les îles se multiplient, et ne parviendrait à son maximum d'excursion, soit au nord, soit au sud, que dans les deux grands continents qu'il traverse; enfin qu'il existerait, entre les sections australe et boréale de cette courbe singulière, une symétrie remarquable et beaucoup plus parfaite qu'on ne l'avait d'abord supposé.

L'équateur magnétique ou ligne sans inclinaison est tracé sur les cartes-planches VIII, IX, XI et XII; sur les planches VIII et IX il est indiqué par une ligne ponctuée, et sur les planches XI et XII par une ligne pleine.

§ IV. — *De l'intensité magnétique du globe aux différents points de sa surface.*

VARIATIONS DE L'INTENSITÉ. — Les variations de déclinaison et d'inclinaison montrent combien le problème du magnétisme terrestre est compliqué. On comprend, d'après les résultats que nous avons rapportés, que, si une aiguille aimantée était suspendue librement par son centre de gravité et mobile dans tous les sens, elle serait alors continuellement en mouvement, et au milieu des oscillations irrégulières décrirait chaque jour et chaque année des cônes dont les bases seraient plus ou moins allongées dans les diverses localités. La déclinaison résulte alors de la projection de la courbe décrite par l'extrémité de l'aiguille sur un plan horizontal, et l'inclinaison de la projection sur un plan vertical passant continuellement par la direction de l'aiguille.

Il est important de déterminer l'intensité magnétique dans les différents points du globe, afin d'avoir, dans chaque localité, la direction et l'intensité de la force directrice du magnétisme terrestre.

M. Hansteen paraît être un des premiers qui se soient

occupés des variations de l'intensité. Les résultats auxquels il a été conduit sont les suivants (*Annales de physique*, t. XVII, p. 326) : 1° L'intensité magnétique horizontale est soumise à des variations diurnes; 2° le minimum de cette intensité a lieu entre 10 et 11 heures du matin, et le maximum entre 4 et 5 heures de l'après-midi; 3° les intensités moyennes mensuelles sont elles-mêmes variables; 4° l'intensité moyenne, vers le solstice d'hiver, surpasse beaucoup l'intensité moyenne donnée par des jours semblablement placés relativement au solstice d'été; 5° les variations d'intensité moyenne d'un mois à l'autre sont à leur minimum en mai et en juin, et à leur maximum vers les équinoxes; l'amplitude maximum d'un mois à l'autre n'excède pas deux centièmes de la valeur de l'intensité moyenne. Suivant M. Hansteen, l'inclinaison elle-même étant soumise à des variations diurnes, les variations de l'intensité de la composante horizontale devaient être attribuées à des changements dans l'inclinaison; mais aujourd'hui que les observations magnétiques sont faites avec une grande précision, il est certain que non-seulement la direction de la force varie, mais encore l'intensité elle-même.

MM. Gauss et Weber se sont servis des magnétomètres pour étudier les variations de l'intensité de la composante horizontale. Ils ont trouvé que l'intensité décroît pendant les heures de la matinée, de telle sorte qu'elle atteint son minimum une ou deux heures avant midi, et qu'elle augmente de nouveau à partir de ce temps. M. Weber a reconnu que des variations irrégulières, quelquefois très-considérables, se montrent à de courts intervalles, et ne sont pas moins fréquentes que dans la déclinaison. En construisant les courbes qui représentent les variations de l'intensité et les variations de déclinaison, les mouvements de ces deux courbes n'ont aucune ressemblance; néanmoins on voit que là où la déclinaison est fortement troublée, il y a également perturbation dans l'intensité horizontale. Maintenant, dans les observatoires, surtout en Allemagne, on suit les va-

riations des composantes du magnétisme terrestre et de l'intensité horizontale; il est utile de connaître la valeur de cette composante, car, d'après la théorie mathématique de M. Gauss, elle entre directement dans les calculs.

Quant aux variations annuelles et séculaires, on ne pourra les apprécier qu'à l'aide de séries de déterminations de l'intensité absolue du magnétisme terrestre, indépendamment de l'intensité magnétique des aiguilles.

L'aurore boréale agit sur l'intensité magnétique comme sur l'inclinaison et la déclinaison, et donne lieu à des variations irrégulières; ainsi, ce météore apporte des perturbations dans tous les éléments de la force magnétique du globe.

De l'intensité magnétique dans différents pays.

Les membres de l'Académie des sciences, chargés de rédiger des instructions pour l'expédition de la Pérouse recommandèrent d'observer la durée d'oscillation d'une aiguille d'inclinaison à des stations très-éloignées, afin d'en déduire des différences entre les intensités des forces magnétiques correspondantes à ces stations.

Les observations recueillies à cet égard ont été perdues avec l'infortuné la Pérouse. Néanmoins, d'après une lettre de Paul Lamanon, chargé des observations magnétiques durant le voyage de ce navigateur, et qui est entre les mains de M. le capitaine Duperrey, il paraît que des séries d'observations étaient parvenues à l'Académie des sciences en juillet 1787. Dans cette lettre se trouvent consignés les principaux résultats des observations faites depuis le départ de Brest jusqu'en janvier 1787, époque du séjour de l'expédition à Macao. On y remarque effectivement les faits importants suivants :

1° La force attractive de l'aimant est moindre dans les tropiques qu'en avançant vers les pôles;

2° L'intensité magnétique, déduite du nombre des oscillations de l'aiguille de la boussole d'inclinaison, change et augmente avec la latitude.

Les instructions données pour ce voyage ont été mises

à profit par M. de Rossel, qui accompagnait d'Entrecasteaux dans son voyage à la recherche de l'intrépide navigateur. Les observations de M. de Rossel ont été faites de 1791 à 1794 avec une aiguille d'inclinaison dont la force avait été essayée avant le départ de l'expédition; mais rien ne prouve qu'à son retour on ait cherché à s'assurer si elle n'avait pas perdu de son magnétisme, en sorte que l'on ne peut en déduire de résultats définitifs qu'en s'appuyant sur de nouvelles observations. Cependant, une série d'observations faites en 1792 et 1793 à la terre de Van-Diémen et à Amboine, alors que l'on s'était assuré que l'aiguille n'avait éprouvé aucun changement entre ces deux points, montre l'accroissement en cheminant de l'équateur au pôle.

M. de Humboldt a mis hors de doute, par de nombreuses observations faites avec le plus grand soin dans son voyage en Amérique, de 1788 à 1803, que l'intensité de la force magnétique du globe est variable en différents points (1). Depuis cette époque, les physiciens et les voyageurs n'ont point cessé de s'occuper de recherches relatives à la détermination des forces magnétiques terrestres.

On peut voir dans le *Traité de Magnétisme* de M. Becquerel, p. 354, un tableau des intensités magnétiques relatives pour différents points du globe. Sans vouloir donner un résumé des observations des navigateurs qui ont coopéré à ces déterminations, nous dirons en général que cette intensité diminue de l'équateur aux pôles; en outre, toutes les intensités trouvées depuis l'équateur jusqu'à 80° de latitude sont comprises entre les limites des nombres 0,836 et 1,836. Le nombre 0,836 exprime l'intensité la plus faible, et correspond à l'île Sainte-Hélène (lat. géog. 15° 55′ S.); les nombres les plus forts observés jusqu'ici dans les deux hémisphères sont : dans l'hémisphère nord 1,803 à New-York (lat. géog. 40° 43′ N.),

(1) *Voyage de MM. de Humboldt et Bonpland*, 1re partie, relation historique, t. III, p. 615.

et dans l'hémisphère sud, 1,836, à la terre de Van-Diémen (lat. géog. 43° 33′ S.); l'intensité prise pour unité est celle que l'on a observée à Micuipampa, au Pérou (lat. géog. 15° 55′ S.). L'intensité magnétique aux pôles est donc à peu près double de l'intensité magnétique à l'équateur, et dans l'intervalle on retrouve des valeurs intermédiaires modifiées par les circonstances locales.

Des lignes isodynamiques.

M. Hansteen, en réunissant toutes les observations d'intensité magnétique faites depuis 1790 jusqu'en 1830, a tracé sur une carte des lignes d'égale intensité magnétique ou lignes isodynamiques, au moyen desquelles il a cru reconnaître la présence de deux pôles magnétiques dans chaque hémisphère, mais avec cette différence que l'intensité magnétique totale est plus petite dans l'hémisphère austral que dans l'autre hémisphère. M. Kupffer n'a pas admis les conséquences déduites du travail de M. Hansteen; M. Duperrey a partagé cette opinion, car les inflexions que suivent les lignes isodynamiques dépendent probablement des anomalies dues en grande partie à la température des différentes régions que l'on considère. M. Duperrey s'est attaché, en conséquence, à déterminer l'état actuel de l'action magnétique à la surface du globe ainsi que la cause de ses variations en direction et en intensité, en s'appuyant sur ses propres observations et sur celles de MM. de Rossel, de Humboldt, Sabine, Hansteen, Keilhau et Boeck, Lütké, King, Due, Erman et Kupffer. Il est parvenu ainsi à construire neuf courbes isodynamiques au nord et autant au sud de l'équateur magnétique; celles de l'hémisphère nord diffèrent très-peu de celles qui ont été tracées par M. Hansteen au-delà du tropique du cancer, mais dans l'hémisphère sud et sous les tropiques elles en diffèrent complétement. Les cartes, pl. XI et XII, représentent les lignes isodynamiques de M. Duperrey. La ligne sans inclinaison ou l'équateur magnétique réel ne coïncide pas précisément avec la ligne des minima d'intensité

magnétique, mais il est très-probable qu'elle n'en est pas très-éloignée; du reste, M. Duperrey n'a présenté ses cartes isodynamiques qu'avec une certaine réserve, car les observations d'intensité paraissent assujetties à des causes d'erreur dont il n'est pas encore possible de les débarrasser complétement.

Si l'on fait attention à l'inflexion des lignes isodynamiques en les comparant aux lignes isothermes, on voit que les points de chaque méridien où l'intensité est un minimum semblent être très-près s'ils ne sont pas eux-mêmes les points les plus chauds; ainsi, la ligne des minima d'intensité, la ligne des plus hautes températures, et la ligne sans inclinaison semblent avoir une marche analogue; lorsque ces lignes seront connues avec plus de précision, on pourra savoir à quoi s'en tenir à cet égard.

Dans la carte pl. XII, M. Duperrey n'a pas indiqué les pôles magnétiques, parce que les lignes isodynamiques ne sont pas assez exactes pour offrir un moyen d'en bien déterminer la position; mais il a marqué deux espaces ombrés qui doivent nécessairement contenir les pôles en question.

Dans la supposition où il existe deux pôles magnétiques très-rapprochés du centre de la terre, M. Biot a donné la formule $i=\sqrt{1+3\sin^2\lambda}$ qui représente la loi de l'accroissement de l'intensité magnétique de l'équateur au pôle, en admettant que la terre soit parfaitement homogène. Cette formule, dans laquelle i est l'intensité et λ la latitude, ne pouvant être vérifiée par des observations isolées, M. Duperrey a été obligé de prendre l'intensité moyenne de l'équateur terrestre et de chacun des parallèles du globe de 10° en 10°, puis de multiplier la circonférence de chaque courbe par son intensité, afin d'avoir l'intensité totale et de prendre ensuite la moyenne des intensités totales des parallèles correspondants dans chaque hémisphère; il a obtenu ainsi tous les points de la courbe qui représente la loi de l'accroissement des forces magnétiques d'après l'observation. Cette courbe, tracée à côté de celle qui résulte de la formule

de M. Biot, ne s'en écarte que d'environ 0,015 d'intensité, en supposant l'unité sur l'équateur magnétique au Pérou. (Voyez planche X.) Il a trouvé en outre que la surface de l'hémisphère magnétique nord est à la surface de l'hémisphère magnétique sud dans le rapport de 1,000 à 1,0152, rapport qui est le même que celui de l'intensité totale de l'hémisphère terrestre austral à l'intensité totale de l'hémisphère terrestre boréal ; d'où il conclut que les surfaces des deux hémisphères magnétiques sont proportionnelles aux intensités totales des deux hémisphères terrestres.

M. Duperrey attribue en grande partie la différence dans les intensités relatives du magnétisme de chaque lieu, à la différence de température de ces lieux. Il assure qu'en comparant les lignes isothermes et les lignes isodynamiques, on rencontre une analogie remarquable dans leurs courbures, entre autres dans la direction de leurs concavités et de leurs convexités. Il cite encore en faveur de sa théorie le mouvement diurne de l'aiguille aimantée. Lorsque le soleil se lève, il vient échauffer successivement tous les points de l'horizon à l'orient du lieu des observations; l'intensité magnétique diminue à mesure que la chaleur augmente; il en résulte que la ligne isodynamique qui passe par la station se renfle en s'éloignant de l'équateur, et s'élève vers le nord ou vers le sud, suivant que la station est dans l'hémisphère magnétique boréal ou dans l'hémisphère magnétique austral. L'aiguille aimantée, qui lui est toujours perpendiculaire, suit le mouvement, et la pointe nord s'avance pour les stations boréales vers l'ouest, et vers l'est pour les stations australes. Lorsque le soleil a dépassé le méridien, l'horizon se refroidit à l'orient et s'échauffe à l'occident : la ligne isodynamique se déplace de nouveau, reprend sa position primitive et la dépasse en sens inverse; l'aiguille, en suivant ce mouvement, dirige sa pointe nord, pour les stations boréales, vers l'est, et pour les stations australes, vers l'ouest. Lorsque la station est sur l'équateur magnétique ou à peu de dis-

tance, la pointe nord de l'aiguille s'avance tous les matins vers l'ouest ou vers l'est, suivant que le soleil passe au nord ou au sud de la station, et le phénomène se rattache encore au même principe; car la condition de l'équateur magnétique étant d'être la ligne des plus petites intensités dans chaque méridien, il doit nécessairement se déplacer tous les jours en s'élevant obliquement vers le parallèle que décrit le soleil. M. Duperrey a cherché à appuyer sa théorie de tous les faits que l'expérience a fournis jusqu'ici, et en a déduit que l'hémisphère terrestre sud est plus froid d'environ un degré que l'hémisphère nord.

§ V. — *Variation de l'action magnétique à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère.*

D'après ce que nous avons vu, on peut, par un premier aperçu, considérer la terre comme agissant de la même manière qu'un aimant qui aurait ses pôles dans la direction de la ligne des pôles terrestres.

Cette action magnétique doit s'étendre dans l'espace, et une aiguille aimantée placée à une certaine distance de la surface terrestre doit encore obéir à l'influence du globe. Les expériences faites par MM. Gay-Lussac et Biot, lors de leur ascension aérostatique, montrent que l'intensité décroît très-lentement à mesure que l'on s'éloigne de la terre et qu'à 5000 mètres il n'y a que des différences presque insensibles dans le temps des oscillations d'une aiguille de déclinaison.

La détermination des variations de l'intensité magnétique à mesure que l'on s'éloigne de la terre est très-complexe, à cause des variations simultanées qui ont lieu dans la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité; il est donc nécessaire de chercher séparément comment varient ces divers éléments avant de tirer aucune induction à cet égard. Plusieurs observateurs ont essayé de déterminer en s'élevant sur les montagnes les variations de l'intensité horizontale, et ils sont parvenus à des résultats discordants, probablement par les motifs

que nous venons de citer. La question étant donc encore fort obscure, nous nous contenterons de dire que, suivant M. Bravais (*Annales de physique et de chimie*, troisième série 1846, tome XVII, p. 223), le décroissement de l'intensité horizontale est inférieur à $\frac{1}{1000}$ par 1000 mètres d'élévation.

On a fait aussi quelques observations pour savoir si l'inclinaison varie avec la hauteur. M. de Humboldt a trouvé 2' de diminution pour 260 mètres, en opérant à la surface de la terre et dans les profondeurs d'une mine; M. Bravais a trouvé, lors de son ascension au Mont-Blanc, 0',1 de diminution pour 2,88 kilomètres d'écart vertical; les observations de Brienz, de Thun et du Faulhorn, lui ont donné au contraire un accroissement de 4',4 pour un kilomètre de différence. Ces divergences montrent que l'action locale a une beaucoup plus grande influence qu'on ne l'avait pensé.

§ VI. — *De la théorie mathématique du magnétisme terrestre.*

Le tracé graphique des observations magnétiques considérées isolément ou groupées ensemble, de manière à nous représenter les méridiens magnétiques, les lignes d'égale déclinaison, d'égale inclinaison, et d'égale intensité, peut être considéré comme un premier pas vers la solution de la grande question du magnétisme terrestre. La forme et la position de ces lignes variant avec le temps, il en résulte qu'une même carte ne représente l'état du magnétisme terrestre qu'à une époque déterminée : c'est ainsi que la carte de déclinaison de Halley diffère beaucoup de celle de Barlow tracée en 1833, et que la carte d'inclinaison de M. Hansteen est loin de donner la position actuelle des lignes d'égale inclinaison. Ce qu'il importe au physicien, c'est de pouvoir enchaîner les résultats de façon à prédire le véritable état des forces magnétiques en un point du globe à une époque quelconque.

M. Gauss a cherché à résoudre cette question, en proposant une théorie du magnétisme terrestre indépendante de toute hypothèse sur la distribution du magnétisme dans l'intérieur de la terre. M. Gauss suppose que la cause, quelle qu'elle soit, qui agit sur l'aiguille aimantée, a son siége dans l'intérieur de la terre, et que la force magnétique en un point du globe est celle qui dirige l'aiguille aimantée librement suspendue par son centre de gravité. Quant aux variations diurnes régulières ou irrégulières, il les considère comme très-faibles eu égard à la force magnétique elle-même; du reste, en prenant des moyennes, on peut les éliminer. Il évalue cette force à l'aide des trois coordonnées rectangulaires, c'est-à-dire à l'aide de trois composantes, deux horizontales et une verticale, et il a trouvé, en calculant la somme de toutes les actions magnétiques exercées par les diverses parties de la terre sur l'aiguille aimantée, que les trois composantes s'expriment très-facilement à l'aide d'une fonction unique; ainsi, trois composantes remplacent donc avec avantage la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité, éléments si naturels en apparence, mais qui, sous le rapport mathématique, ne sont pas d'un emploi aussi commode.

Pour la théorie mathématique, il importe donc que l'on représente graphiquement toutes les circonstances de la composante horizontale, composante qui fournit des éléments primitifs immédiatement propres à être mis en usage, tandis que la force magnétique totale, loin d'être directement observée, est déduite du calcul avec le secours de l'inclinaison. M. Gauss a comparé pour un grand nombre de localités les résultats des observations et ceux du calcul, et a vérifié leur exactitude. Maintenant que les observations magnétiques sont faites en différents points du globe avec toute la rigueur désirable, il faut espérer que l'on arrivera à connaître la force magnétique en un point déterminé du globe, à une époque quelconque. (Voir Becquerel, *Traité du magnétisme*, page 495 et suivantes.)

SECTION II.

DE L'ORIGINE DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

§ I. — *État magnétique de la matière.*

Les expériences de plusieurs physiciens ont prouvé que tous les corps obéissent à l'action des aimants, mais à un degré moindre que le nickel, le fer et le cobalt, qui sont les trois seuls métaux magnétiques connus. Si l'on représente par 1000000 l'action exercée par un barreau aimanté ayant l'unité de force et à l'unité de distance, sur un cube de fer, de nickel, ou de cobalt ayant l'unité de poids (ces trois actions sont les mêmes, les métaux étant doux et à la température ordinaire), l'action exercée sur une roche non ferrugineuse et assez pure, telle que du granit, du calcaire, etc., est très-variable et en général est comprise entre 0 et 100; sur les autres substances elle peut être plus considérable. Nous citerons quelques nombres pour exprimer les actions relatives de diverses roches, et montrer entre quelles limites elles sont comprises. (Becquerel, *Traité de magnétisme*, page XCIII.)

Fer		1000000
Granit.	1er échantillon	51
	2me id.	140
Porphyre	antique rougeâtre	71
	quartzifère	126
	vert des Vosges	1391
Trachyte rétinite		10386
Basalte de l'île Bourbon		8844

Il est possible que l'action exercée par les substances pures et limpides sur l'aiguille aimantée soit une action propre, mais dans beaucoup de circonstances, comme dans les échantillons cités plus haut, l'effet provient du mélange de fer, car il faut bien peu de ce métal pour donner lieu à des effets sensibles; dans les roches répandues à la surface de la terre le second effet l'emporte

donc de beaucoup sur l'action propre qui serait produite par les substances isolées si elles étaient pures. Quoi qu'il en soit, les nombres indiqués plus haut représentent combien, sous un volume déterminé, il y aurait en poids de particules magnétiques susceptibles d'exercer la même action que des particules de fer doux, ou du moins, combien il faudrait mélanger de ces particules avec les corps supposés inertes, pour donner lieu aux mêmes effets.

M. Hansteen a fait une observation que nous devons citer ici, car elle se rapporte à ce sujet. En 1820, il a trouvé qu'une tour exerçait une influence telle sur une aiguille aimantée, que cette dernière placée au pied oscillait plus vite au nord qu'au sud; à l'extrémité supérieure, c'était le contraire. M. Hansteen en a tiré cette conséquence, qu'un objet vertical, quelle que soit sa nature, a dans nos climats deux pôles magnétiques distincts : le pôle sud dans le haut, le pôle nord en bas. (*Annales de physique*, tome XVII, p. 331.) Il serait à désirer que l'on pût s'assurer si la roche constituante de la tour a produit seule une action dans cette circonstance, et que l'on fît de nouveau des recherches dans cette direction, afin de constater si un effet semblable se manifeste réellement sous l'influence des masses qui ne sont pas des roches ferrugineuses proprement dites.

Lorsque les roches contiennent du fer, l'action exercée par elles peut être très-énergique; il résulte de là que sous l'influence terrestre elles peuvent posséder la propriété polaire et constituer des aimants permanents.

Les variétés de fer oxydulé possèdent la propriété polaire, de même que le protoxyde de fer; on distingue particulièrement le fer oxydulé cristallisé en octaèdres réguliers, que l'on trouve en abondance dans les terrains serpentineux. Ces terrains possèdent eux-mêmes la propriété polaire, et peuvent en conséquence être considérés comme des aimants d'une grandeur colossale. Nous citerons, entre autres, les exemples suivants : Le Heidelberg, près de Zell, s'élève au milieu d'un vaste plateau, à la pointe N.-O. du Fichtelgebirge. La mon-

tagne est dirigée du S.-O. au N.-E. comme les roches primitives et intermédiaires de ces contrées; elle appartient au groupe de serpentines enclavées dans les schistes chloriteux et amphiboliques. Dans la chlorite, les parcelles de fer oxydulé sont visibles à l'œil nu, tandis que dans les autres roches on découvre le fer en pulvérisant la masse et en la réunissant avec un barreau aimanté. Les strates de toutes ces roches sont parallèles à l'axe longitudinal de la montagne, qui agit à 7 mètres de distance.

On a cru observer que les roches du Heidelberg qui ont le plus de magnétisme polaire sont aussi celles dont la pesanteur spécifique est la plus grande. Ce qu'il y a de remarquable dans le magnétisme de cette montagne, c'est la distribution et le parallélisme de ses axes magnétiques. M. de Humboldt a observé que les pôles nord sont tous situés à la pente S.-E., et les pôles sud à la pente N.-O.; de sorte que les pôles homonymes occupent une même pente. Le parallélisme des axes est constant à l'extrémité N.-E et dans son centre, mais fort peu sensible à l'extrémité S.-O., où les roches chloriteuses, amphiboliques et talqueuses passent à la vraie serpentine. Les points d'indifférence sont placés aux extrémités N.-E. et S.-O. de la montagne, c'est-à-dire aux extrémités de l'axe longitudinal du Heidelberg, ou selon la ligne qui détermine la direction des couches; les axes magnétiques sont perpendiculaires à la direction de celles-ci.

M. Lichtenberg a supposé que l'orientation de ces axes peut bien être l'effet de tremblements de terre, qui, dans les grandes catastrophes de notre planète, ont agi longtemps dans les mêmes directions. M. de Humboldt a cru voir effectivement changer, dans l'Amérique méridionale, l'inclinaison magnétique, à la suite d'un tremblement de terre, l'intensité des forces étant restée la même. Il serait à désirer que l'on pût savoir si la direction des axes magnétiques est constante, ou si elle change avec la direction du méridien magnétique.

Le magnétisme polaire de ces roches qui renferment des parcelles ou de petits cristaux de fer oxydulé, est souvent bien plus puissant que le magnétisme polaire de ces grandes masses de fer oxydulé qui forment des couches dans les montagnes primitives, et qui ne sont point en contact avec l'atmosphère ou rapprochées de la surface du globe.

M. de Humboldt a trouvé, près de Voisaco, entre Almageur et Pasto, à 2090 mètres de hauteur au-dessus de la mer, une roche de porphyre trachytique qui offrait en petit presque les mêmes phénomènes que la montagne magnétique de Franconie. Sur la pente orientale du Chimborazo, MM. de Humboldt et Bonpland ont trouvé aussi un groupe de porphyre trachytique, en colonnes pentagonales, dont le magnétisme polaire agit à 1 mètre de distance.

§ II. — *Des opinions émises sur l'origine du magnétisme terrestre.*

Gilbert est le premier qui ait avancé que la terre devait être considérée comme un aimant puissant dont l'axe coïncidait sensiblement avec l'axe terrestre. M. Hansteen, tout en adoptant cette opinion, a admis l'existence d'un autre pôle magnétique dans les régions boréales, sans lequel, suivant lui, il n'était pas possible d'expliquer tous les phénomènes magnétiques observés : il faudrait donc admettre qu'un second aimant traversât le globe dans la direction d'un diamètre, ce qui donnerait nécessairement deux pôles magnétiques nord et deux pôles magnétique sud. Il n'est pas probable qu'il en soit ainsi; les effets secondaires et les inflexions des lignes isodynamiques et des méridiens tiennent à des causes locales dont il est difficile de se rendre compte. M. Hansteen cherche la cause du magnétisme terrestre dans le soleil, et il base son opinion sur la marche des oscillations diurnes de l'aiguille aimantée. Le soleil est considéré par lui comme possédant un ou plusieurs pôles magnétiques qui occasionnent une différence dans le magnétisme de

la terre suivant sa position par rapport à cet astre. En adoptant cette hypothèse, la principale difficulté n'est pas vaincue, mais seulement éloignée, puisqu'on est en droit de demander la cause de la force magnétique de cet astre.

M. Biot ayant cherché à lier par le calcul toutes les observations relatives au magnétisme terrestre qui avaient été faites avant et pendant la période du voyage de M. de Humboldt en Amérique, a considéré la terre comme un aimant dont la distance des pôles était d'une quantité indéterminée; il est parti ensuite de ce principe que le pouvoir de chacun de ces pôles variait en raison inverse du carré de la distance au point sur lequel ils agissaient; il obtint ainsi une expression générale de la direction de l'aiguille aimantée. En faisant varier la distance indéterminée et comparant les résultats de l'expérience avec ceux du calcul, il trouva que plus les pôles étaient rapprochés, plus ces résultats s'accordaient ensemble, et que les différences étaient réduites au minimum quand les deux pôles se trouvaient infiniment près l'un de l'autre et à très-peu de distance du centre de la terre.

Les lois déduites de cette hypothèse s'accordent parfaitement, suivant M. Barlow, avec celles d'un corps soumis à un magnétisme passager par influence. Il s'agissait de montrer quelle espèce de magnétisme pouvait communiquer à la terre tous les effets connus; les courants électriques sont venus à son aide et il a admis, comme Ampère l'avait supposé avant lui, que des courants électriques circulaient autour du globe. L'expérience a confirmé ses prévisions : en entourant un globe en bois avec des fils métalliques enroulés de l'est à l'ouest, et parcourus par des courants électriques dans le même sens, le globe a produit sur une aiguille aimantée soustraite à l'influence terrestre et placée dans diverses positions le même genre d'action que la terre lui imprimait dans des positions analogues.

Les faits exposés précédemment tendent donc à dé-

montrer que les phénomènes magnétiques de la terre pourraient être produits par de l'électricité en mouvement. Il ne faut pas se dissimuler les difficultés que l'on rencontre pour expliquer l'existence des courants électriques à la surface de la terre; en mettant de côté les courants qui ont une origine voltaïque, dont la production serait difficile à concevoir, on ne peut que supposer l'existence de courants thermo-électriques dus à l'influence solaire. Si l'on fait attention que toutes les substances qui composent la croûte du globe, à peu d'exceptions près, sont de mauvais conducteurs, et qu'il n'y a guère que les terrains humides qui conduisent l'électricité, on s'explique difficilement leur production.

Nous devons faire remarquer qu'il peut se faire qu'une partie de l'état magnétique du globe soit permanente à l'époque actuelle. En effet, admettons l'état magnétique du globe au moment où il s'est manifesté, à l'origine des choses, et supposons que les couches qui composent la croûte du globe se soient consolidées sous l'influence de cet état magnétique : les diverses roches qui exercent toutes une action sur l'aiguille aimantée, action peu énergique il est vrai par rapport au fer, mais manifeste, ces roches, disons-nous, se sont constituées dans un état d'aimantation qui fait actuellement partie intégrante de la résultante terrestre en chaque lieu.

Les variations diurnes mettent bien en évidence que le magnétisme est influencé par l'action solaire; mais est-ce une cause perturbatrice due au rayonnement solaire qui produit ce changement? ou bien, est-ce la force magnétique elle-même qui subit ces modifications? C'est ce que l'on ne saurait décider actuellement. Les variations annuelles, de même que les variations diurnes montrent bien que plus la terre est échauffée, plus les variations sont fortes; en outre, l'été, l'amplitude des variations est plus forte qu'en hiver. En supposant que ce soient des courants thermo-électriques qui donnent lieu au magnétisme terrestre, on conçoit très-bien que tous les jours ce soit vers le méridien le plus échauffé que se trouve

le maximum de perturbation, et qu'ensuite dans le courant de l'année, à l'époque des plus grandes chaleurs, on observe une période analogue.

On en est donc encore réduit à des conjectures, de sorte que l'origine du magnétisme terrestre n'est pas connue; on ne sait si la terre, qui agit comme un aimant, doit sa propriété magnétique à une action par influence, à des courants électriques, ou bien, en partie ou en totalité, à un état magnétique de la matière composant la croûte du globe.

CHAPITRE VIII.

DES PHÉNOMÈNES MÉTÉORIQUES DONT L'ORIGINE EST INCERTAINE.

SECTION Ire.

DE L'AURORE POLAIRE.

§ Ier. — *Description de l'aurore polaire.*

L'aurore polaire est cette lueur formée par des rayons diversement colorés qui jaillissent de toutes les parties de l'horizon à certaines époques, dans l'hémisphère nord ou dans l'hémisphère sud; dans le premier cas elle prend le nom d'aurore *boréale*, et dans le second celui d'aurore *australe*. L'apparition de ce phénomène est annoncée par des perturbations exercées sur l'aiguille aimantée; ces perturbations, dont nous avons parlé précédemment, établissent une liaison intime entre ce phénomène et la distribution du magnétisme sur le globe, et nous laissent entrevoir que l'aurore polaire a probablement une origine électrique.

L'aurore boréale dans nos contrées a, en général, l'apparence d'un brouillard assez obscur vers le nord, avec un peu plus de clarté vers l'ouest que dans le reste du ciel. Ce brouillard prend peu à peu la forme d'un segment de cercle, s'appuyant de chaque côté sur l'horizon; la partie visible de la circonférence, c'est-à-dire la partie supérieure, est bientôt entourée d'une lumière blanche donnant naissance à un ou plusieurs arcs lumineux; viennent ensuite des jets et des rayons de lumière diversement colorés, partant du segment obscur, dans lequel il se fait parfois quelques brèches éclairées, sem-

blant annoncer un mouvement de fluctuation dans la masse. Quand l'aurore s'est étendue, il se forme une couronne au zénith, où concourent les rayons lumineux. Le phénomène diminue alors d'intensité; on observe cependant encore de temps à autre des jets de lumière, une couronne et des couleurs plus ou moins vives, tantôt d'un côté du ciel, tantôt de l'autre. Enfin le mouvement cesse, la lueur se rapproche de plus en plus de l'horizon, la nue quitte les diverses parties du ciel et s'arrête vers le nord. Le segment obscur en se dissipant devient lumineux; sa clarté est d'abord assez prononcée près de l'horizon, plus faible au-dessus, et finit par se perdre dans le ciel.

L'aurore est quelquefois composée de deux segments lumineux concentriques, ayant leurs extrémités à l'horizon, séparés entre eux par un segment obscur, et de la terre par un autre segment obscur. La pl. XIII, fig. 22, représente une aurore boréale observée par Mairan, à Breuille-Pont, le 19 octobre 1726: elle est composée d'un seul segment obscur, percé symétriquement, autour de son bord, de créneaux à travers lesquels on croyait apercevoir un incendie.

Tels sont les phénomènes généraux de l'aurore boréale, comme les a décrits Mairan dans un traité spécial (Paris, 1754) où il a rendu compte de toutes les observations recueillies jusqu'à lui. Depuis, ce phénomène a été étudié par les physiciens, sans qu'ils soient parvenus pour cela à en connaître la cause. Le travail le plus complet qui ait été fait est dû à la commission scientifique envoyée dans le nord, qui s'est livrée, pendant l'hiver de 1838 à 1839, à des observations suivies à Bossekop (West-Finmark), dans la baie d'Alten, par 70° de latitude nord. Cette baie s'étend dans la direction du nord au sud, comme un large fleuve dont les sinuosités vont se perdre derrière plusieurs promontoires, de sorte que Bossekop semble être sur les bords d'un lac entouré de forêts de sapins et de montagnes neigeuses, dont les crêtes dentellent l'horizon à la hauteur de 5 à 7°.

A partir du 7 septembre 1838 jusqu'en avril 1839, dans l'intervalle de 206 jours, on a compté 143 aurores boréales, qui ont été surtout très-fréquentes du 17 octobre au 25 janvier, pendant l'absence du soleil ; de sorte que cette nuit de 70 fois 24 heures a offert 64 aurores, sans compter celles dérobées à la vue par un ciel entièrement couvert, et dont néanmoins la présence était accusée par les perturbations de l'aiguille aimantée.

Voici l'aspect sous lequel les aurores boréales se sont présentées le plus fréquemment, ainsi que leur marche habituelle, d'après l'excellente description que M. Lottin, un des membres de la commission, a eu l'obligeance de nous communiquer :

Le soir, entre 4 et 8 heures, la brume légère qui règne presque habituellement au nord de Bossekop à la hauteur de 4 à 6°, se colore à sa partie supérieure, ou plutôt se frange des lueurs de l'aurore qui existe derrière. Cette bordure devient plus régulière et forme un arc vague, d'une couleur jaune pâle, dont les bords sont dessus et dont les extrémités s'appuient sur la terre. Cet arc monte plus ou moins lentement, son sommet restant dans le méridien magnétique, ou à très-peu près : position difficile à déterminer avec exactitude à cause de son mouvement ascensionnel et de sa forme déprimée.

Bientôt des stries noirâtres séparent régulièrement la matière lumineuse de l'arc : les rayons sont formés ; ils s'allongent, se raccourcissent lentement ou instantanément ; ils dardent, augmentant et diminuant subitement d'éclat. La partie inférieure, les pieds des rayons offrent toujours la lumière la plus vive, et forment un arc plus ou moins régulier. La longueur de ces rayons est souvent très-variée, mais tous convergent vers un même point du ciel, indiqué par le prolongement de la pointe sud de l'aiguille aimantée (pl. XIV, fig. 23) ; parfois ils se prolongent jusqu'à leur point de réunion, formant ainsi le fragment d'une immense coupole lumineuse (pl. XIV, fig. 24).

L'arc continue à monter vers le zénith; il éprouve un mouvement ondulatoire dans sa lueur, c'est-à-dire que d'un instant à l'autre l'éclat de chaque rayon augmente successivement d'intensité; cette espèce de courant lumineux se montre plusieurs fois de suite, et bien plus fréquemment de l'ouest à l'est que dans le sens opposé. Quelquefois, mais rarement, un mouvement rétrograde a lieu immédiatement après le premier, et aussitôt que cette lueur a parcouru successivement le ciel de l'ouest à l'est, elle se dirige dans le sens inverse, revenant ainsi à son point de départ, sans que l'on puisse dire si ce sont les rayons qui éprouvent alors un mouvement de translation à peu près horizontal, ou si cette lueur plus vive se transporte d'un rayon à l'autre de proche en proche sans que ceux-ci éprouvent de déplacement.

L'arc offre un mouvement alternatif dans le sens horizontal, figurant les ondulations ou les plis d'un ruban ou d'un drapeau agité par le vent (pl. XIV, fig. 25). Parfois, un de ses pieds, et même tous les deux abandonnent l'horizon; alors les plis deviennent plus nombreux, mieux prononcés, l'arc n'est plus qu'une longue bande de rayons qui se contourne, se sépare en plusieurs parties formant des courbes gracieuses (pl. XIV, fig. 26 et 27), lesquelles se referment presque sur elles-mêmes et offrent, n'importe dans quelle partie de la voûte céleste, ce qu'on a appelé jusqu'ici couronne boréale. Alors l'éclat des rayons varie subitement d'intensité et dépasse celui d'étoiles de première grandeur; ces rayons dardent avec rapidité; les courbes se forment et se déroulent comme les plis et replis d'un serpent. Puis les rayons se colorent : la base est rouge, le milieu vert; le reste conserve sa teinte lumineuse jaune claire. Ces couleurs ont toujours, sans exception, conservé ces positions respectives; elles sont d'une admirable transparence; le rouge approche de la teinte sang-clair, le vert de celle d'une émeraude pâle. L'éclat diminue, les couleurs disparaissent, tout s'éteint subitement ou s'affaiblit peu à peu. Des fragments d'arc reparaissent; l'arc se reforme lui-même, continue son

mouvement ascensionnel et approche du zénith; les rayons, par l'effet de la perspective, deviennent de plus en plus courts; on peut juger de l'épaisseur de l'arc, qui offre alors parfois une large zone de rayons parallèles; puis le sommet de l'arc atteint le zénith magnétique, point désigné par la pointe sud de l'aiguille d'inclinaison; alors les rayons sont vus par leurs pieds; s'ils se colorent en ce moment, ils montrent une large bande rouge à travers laquelle on distingue les nuances vertes qui leur sont supérieures, et s'ils subissent ce mouvement de translation horizontale dont on a déjà parlé, les pieds forment une longue zone sinueuse et onduleuse, tandis que dans tous ces changements continuels, les rayons n'éprouvent jamais d'oscillation dans le sens de leur axe et conservent toujours leur parallélisme.

Pendant l'intervalle de temps qui vient d'être décrit, de nouveaux arcs se sont présentés à l'horizon, commençant d'une manière diffuse, ou avec les rayons tout formés et très-vifs. Ils se succèdent en passant à peu près par les mêmes phases, et se maintiennent à distance les uns des autres; on en compte ainsi jusqu'à neuf appuyés sur les terres, et rappelant par leur disposition ces toiles cintrées qui vont d'une coulisse à l'autre et figurent le ciel de nos scènes théâtrales. Parfois les intervalles diminuent, plusieurs de ces arcs se serrent l'un contre l'autre; c'est une large zone de rayons parallèles qui traversent le ciel, et vont disparaître vers le sud en s'affaiblissant rapidement après leur passage au zénith. Mais parfois aussi, lorsque cette zone occupe le haut du ciel, s'étendant de l'est à l'ouest, la masse de rayons qui ont déjà dépassé le zénith magnétique paraît tout à coup venir du sud, et forme avec ceux du nord la véritable couronne boréale, dont tous les rayons convergent vers le zénith magnétique. Ainsi cette apparence de couronne ne vient sans doute que d'un simple effet de perspective, et l'observateur placé dans cet instant à une certaine distance au nord ou au sud n'apercevrait qu'un arc.

La zone totale des rayons étant moins épaisse dans le sens nord et sud que dans le sens est et ouest, puisqu'elle s'appuie souvent sur les terres, la couronne a une forme elliptique. Mais cela n'a pas toujours lieu : on l'a vue circulaire, les rayons inégaux ne s'étendant pas à plus de 8° à 12° du zénith, tandis que d'autres fois ils vont jusqu'à l'horizon.

Si l'on pense qu'alors tous les rayons précédemment mentionnés dardent souvent avec vivacité, variant continuellement et subitement dans leur longueur et dans leur éclat ; que de belles teintes rouges et vertes les colorent par intervalles ; que des mouvements ondulatoires ont lieu comme ceux qui sont produits dans une étoffe légère ; que les courants lumineux se succèdent ; enfin que la voûte céleste tout entière offre une immense et magnifique coupole étincelante, dominant un sol couvert de neige qui lui-même sert de cadre éblouissant à une mer calme et noire comme un lac d'asphalte ; on n'aura encore qu'une idée très-imparfaite de l'admirable spectacle qui s'offre alors à l'observateur et qu'il faut renoncer à décrire.

La couronne ne dure que quelques minutes ; elle se forme quelquefois instantanément sans aucun arc préalable. Rarement il y en a plus de deux dans la même nuit, et bien des aurores en sont privées.

La couronne s'affaiblit, tout le phénomène est au sud du zénith, formant des arcs plus pâles, et qui disparaissent généralement avant d'avoir atteint l'horizon sud. Le plus ordinairement tout ceci a lieu dans la première moitié de la nuit ; après quoi l'aurore paraît avoir perdu de son intensité ; des faisceaux de rayons, des bandes, des fragments d'arc paraissent et disparaissent par intervalle ; puis les rayons deviennent de plus en plus diffus : ce sont des lueurs vagues et faibles qui finissent par occuper tout le ciel, groupées comme de petits cumulus et désignées sous le nom de plaques aurorales. Leur lumière lactée éprouve souvent des changements très-vifs dans son intensité, semblables à des mouvements de dilatation et de

contraction qui se propagent du centre à la circonférence, et réciproquement. La lueur crépusculaire arrive peu à peu, et le phénomène, s'affaiblissant graduellement, cesse d'être visible. D'autres fois les rayons paraissent encore avec le commencement du jour, puis ils disparaissent tout à coup, ou bien à mesure que le crépuscule augmente, ils deviennent vagues, prennent une couleur blanchâtre et finissent par se confondre dans les cirro-stratus, de telle sorte qu'il devient impossible de les distinguer de cette espèce de nuage.

§ II. — *Examen des différentes parties de l'aurore polaire.*

Dans le paragraphe précédent, nous avons donné la description générale de l'aurore polaire; il s'agit maintenant de préciser la position de diverses parties, suivant les différentes heures auxquelles elles se montrent. Nous prendrons pour guide M. Bravais, membre de la commission scientifique du Nord, qui a étudié à Bossekop toutes les particularités des aurores boréales.

Du segment obscur. — Le segment obscur qui se présente au commencement de l'aurore, à Bossekop, a une étendue de 10° environ au-dessus de l'horizon; il est situé dans le méridien magnétique, du côté où l'atmosphère est habituellement brumeuse la nuit comme le jour, en raison de la mer Glaciale située de ce côté. On s'est demandé si ce segment ne serait pas par hasard une brume.

Des arcs de l'aurore. — M. Argelander a remarqué que le point de culmination de l'arc, à peu près situé dans le méridien magnétique, s'en dévie néanmoins de 10° vers l'occident. Ce résultat a été confirmé par les membres de la commission, qui ont trouvé par des observations multipliées que l'arc change d'orientation avec sa hauteur, et qu'à mesure qu'il s'élève il semble éprouver un mouvement de rotation de l'ouest à l'est en passant par le sud. M. Bravais pense que ces faits s'accordent avec

la manière de voir de M. Hansteen, qui considère l'arc comme un anneau lumineux dont les différents points sont à égale distance de la surface de la terre, et qui est centré autour du pôle magnétique boréal de manière à couper à angle droit tous les méridiens magnétiques qui convergent vers ce pôle. Un semblable anneau doit se présenter à nous avec les apparences sous lesquelles nous voyons une aurore boréale, et son sommet apparent est toujours situé dans le méridien magnétique du lieu. Pour expliquer le changement d'orientation des arcs avec la hauteur, il faut admettre que la déclinaison magnétique augmente en s'élevant le long de la verticale de Bossekop, et que si cette cause ne suffit pas, il serait nécessaire d'ajouter que l'aurore boréale est plus élevée au-dessus des continents qu'au-dessus des mers. Toutefois il est bon d'observer que ce ne sont encore que des hypothèses. Indépendamment de la position moyenne des arcs lumineux, il arrive que des causes accidentelles dévient plus ou moins l'arc de la position ordinaire; ces déviations peuvent même aller jusqu'à changer de 80° l'azimut de culmination, comme cela est arrivé dans la nuit du 16 janvier 1839. Ces causes perturbatrices agissent quelquefois pendant plusieurs heures de suite, et dans le même sens pendant toute sa durée.

M. Bravais considère un arc auroral comme étant circulaire dans sa partie supérieure, tandis que près de l'horizon il commence à s'écarter du petit cercle perpendiculaire au plan de symétrie, et dont la projection orthographique serait une ligne droite: l'arc pourrait donc avoir l'apparence elliptique. Il n'est pas rare de voir plusieurs arcs briller au même instant, et paraissant converger vaguement de l'est à l'ouest vers deux points abaissés de quelques degrés au-dessous de l'horizon.

Les arcs auroraux présentent souvent, comme on l'a vu, des apparences bizarres et irrégulières, comme celle d'une draperie ondulante. Ces formes variées montrent que mille causes perturbatrices empêchent l'arc auroral

de se ranger perpendiculairement au méridien magnétique terrestre, et de se centrer autour du pôle magnétique nord. L'arc, dès l'instant de sa formation, ne reste pas toujours dans la même position; il peut se transporter du nord au sud ou du sud au nord : ainsi, un arc qui d'abord se sera montré près de l'horizon nord peut s'élever graduellement, atteindre le zénith, descendre vers l'horizon austral, y rester quelque temps stationnaire, et puis revenir sur ses pas. Les pieds de l'arc, presque fixes à l'est ou à l'ouest de la boussole, paraissent alors tourner autour de ces points comme autour d'une charnière.

Il a été constaté que les arcs des aurores ont paru marcher soixante fois du nord vers le sud, et trente-neuf fois dans le sens opposé. Le mouvement angulaire de l'arc peut monter jusqu'à 17° par minute; il n'est pas rare de le voir de 5° dans le même temps. En supposant à l'atmosphère une hauteur verticale de 200 kilomètres, et que le phénomène eût lieu à la limite, ce dernier mouvement supposerait une vitesse effective de 300 mètres par seconde; les mouvements des rayons auroraux sont encore plus rapides.

La lumière des arcs est d'un blanc jaunâtre uniforme; le bord inférieur est mieux limité que le bord supérieur, et ce dernier se termine vaguement, en se fondant avec la teinte générale du ciel. Peut-être doit-on attribuer en partie la plus grande netteté du bord inférieur à son plus grand éloignement de l'observateur.

L'éclat des arcs peut atteindre, mais rarement, celui des étoiles de première grandeur. Ces arcs sont précisément ceux formés presque toujours de rayons parallèles juxtaposés. Les arcs de deuxième grandeur sont assez fréquents; ceux de troisième et de quatrième le sont davantage. Les arcs de cinquième et de sixième grandeur sont plus rares.

Les arcs auroraux ont une tendance à se décomposer en rayons courts, convergeant vers le zénith magnétique. Il arrive quelquefois que la résolution de l'arc en rayons

n'est que partielle; l'arc nébuleux subsiste, mais, de toutes les parties de son bord supérieur, s'élancent des colonnes lumineuses dirigées vers le zénith magnétique; plus rarement les rayons partent du bord inférieur et se dirigent vers l'horizon.

Les arcs nébuleux sont formés d'arcs partiels parallèles entre eux, juxtaposés et presque contigus. Cette disposition fibreuse est principalement observée dans les bandes zénithales.

Rayons de l'aurore. — Ces rayons sont des colonnes lumineuses, beaucoup plus longues que larges, et qui, prolongées, iraient aboutir au zénith magnétique du lieu. Il y a des rayons de toutes les longueurs possibles, depuis 2 à 3° jusqu'à 10°, et même plus. Leur largeur varie depuis 10 minutes jusqu'à 2 ou 3°. Les rayons beaucoup plus larges doivent être considérés comme des réunions de rayons. Les rayons varient d'éclat comme les arcs; cet éclat atteint souvent celui des étoiles de première grandeur, et descend rarement jusqu'à la cinquième. Le pied est presque toujours mieux limité que la partie supérieure. Les étoiles sont souvent visibles à travers la substance des rayons; la disparition de leur lumière semble dépendre uniquement de la clarté du fond sur lequel elles se projettent. On observe deux mouvements dans les rayons : le mouvement longitudinal, qui s'effectue vers le zénith ou vers l'horizon; et le mouvement latéral, qui déplace le rayon parallèlement à lui-même. Ces deux mouvements sont quelquefois fort rapides.

Des couronnes. — Quand la partie de l'atmosphère terrestre située au-dessus de l'observateur est occupée par un grand nombre de rayons distincts, parallèles à la direction de l'aiguille d'inclinaison, ces rayons, par un effet de perspective, semblent converger vers le zénith magnétique, qui est la rencontre de la sphère céleste avec la ligne visuelle menée de l'œil de l'observateur parallèlement à l'aiguille d'inclinaison; de là résulte une couronne pourvue de ses rayons, et dont la partie centrale reste obscure.

On a déterminé la position du point de fuite par rapport aux étoiles. Les observations et le calcul ont conduit aux conséquences suivantes : les couronnes, quand elles sont incomplètes, occupent de préférence la partie boréale de l'hémisphère visible ; il en est de même des arcs. Les rayons qui engendrent la couronne se distribuent dans l'espace de manière à embrasser une région fort étendue, mais limitée, laquelle a ordinairement une forme elliptique, allongée dans le sens est ou ouest.

Lorsque les rayons de la couronne prennent un vif éclat, entrent en mouvement, et se dépouillent de leur teinte jaunâtre habituelle pour se colorer en rouge et en vert, la couronne possède alors son plus haut degré de magnificence. Indépendamment de ces couronnes, il s'en produit d'autres extra-zénithales, composées de faisceaux de rayons animés de mouvements ondulatoires ou de mouvements vibratiles, et complétement séparées de la ligne visuelle qui aboutit au zénith magnétique.

Plaques et lueurs vagues de l'aurore. — Lorsque le phénomène de l'aurore s'affaiblit, les rayons deviennent plus faibles, leurs bords plus diffus; leur longueur diminue même et leur largeur devient plus considérable ; ils prennent l'apparence de cumulus lumineux : ce sont les plaques de l'aurore boréale. Quand leur forme est fibreuse, elles ont une très-grande ressemblance avec les cirrus : aussi les appelle-t-on cirrus d'aurore. Les plaques aurorales se groupent, comme les rayons, en séries, et forment ces arcs ou bandes nébuleuses ressemblant, par leur forme générale et leur orientation, aux arcs ordinaires de l'aurore. En examinant, d'après l'ensemble des quarante-six nuits qui ont offert ce phénomène, leur moyenne de la première apparition est 11 heures 18 minutes du soir, leur moyenne de la disparition a été 2 heures 3 minutes du matin.

La dernière phase du phénomène est la disposition de l'aurore en lueurs vagues, analogues à une légère vapeur. Ces lueurs, répandues sur une portion considérable du ciel, peuvent recouvrir presque en entier la voûte céleste.

Leur éclat surpasse à peine, dans certains cas, celui de la voie lactée; elles conservent encore quelquefois des traces visibles de leur tendance à converger vers le zénith magnétique, ou à se disperser en arcs ou en bandes zénithales. Peu intenses dans la région du ciel au-dessus de l'observateur, il arrive souvent que leur accumulation près de l'horizon y détermine une lumière assez vive imitant un vaste foyer d'incendie, et que leur réverbération peut éclairer les bords des nuages sombres interposés entre elles et l'observateur.

Mouvements de palpitation. — Les plaques et les lueurs aurorales offrent souvent des mouvements fort irréguliers, que les membres de la commission scientifique ont appelés plaques ou lueurs palpitantes, et qui forment l'un des traits les plus saillants de l'aurore boréale. L'époque moyenne de cette nouvelle phase correspond à l'intervalle entre 3 heures 12′ et 3 heures 53′ du matin; elle est postérieure d'environ 2 heures à l'apparition même des plaques. Cette apparition appartient en propre à la période de déclin. Ordinairement toutes les plaques aurorales obéissent à la fois aux mêmes alternatives de recrudescence et de défaillance de leur lumière, mais cela n'est pas général.

La matière des aurores n'a pas assez de densité pour affaiblir bien sensiblement la lumière des étoiles. Lorsque l'aurore est diffuse et laiteuse, les plus petites étoiles peuvent être vues au travers, et leur position apparente n'est pas changée. L'aurore boréale répand quelquefois assez de clarté pour illuminer une partie de l'atmosphère; cette clarté toutefois est moindre que celle de la pleine lune. Les lueurs auroriques ne sauraient être un effet de réverbération.

Intensité lumineuse et couleurs des aurores. — La couleur de l'aurore boréale est ordinairement blanche; mais elle peut varier au jaune pâle, et parfois tourner au rougeâtre. Plus la lumière est faible, plus la teinte devient laiteuse; plus elle est vive au contraire, plus les tons jaunes se renforcent. Les mouvements rapides qui

accompagnent toujours l'aurore colorée sont le mouvement longitudinal vibratile et le mouvement latéral ondulatoire. Dès que ces mouvements deviennent assez précipités pour que les rayons se colorent, la teinte jaune brillante reflue des extrémités des rayons vers le centre; l'une de ces extrémités devient rouge, et l'autre verte. Les effets changent suivant que le rayon se meut latéralement de droite à gauche, ou de gauche à droite. Le rouge de l'aurore est teinté de violet; suivant M. Bravais, il n'a pas son analogue dans le spectre solaire. Le vert lui a paru assez franc, mêlé peut-être d'un peu de bleuâtre. La teinte rouge est la plus éclatante des deux et celle qui disparaît la dernière.

Le professeur Keilhau, qui a passé un hiver à Talvig, dans le Finmark, et qui a observé cinq effets de coloration, dit que le rouge est en haut et le vert en bas. Quelques observateurs ont mentionné la présence du bleu. Souvent le rouge et le vert laissent entre eux un jaune blafard intermédiaire; plus souvent encore, cette dernière couleur disparaît complétement. Les deux couleurs rouge et verte sont-elles complémentaires? On l'ignore. La lueur rougeâtre rappelle assez bien la lueur purpurine produite par le passage de l'électricité à travers l'air raréfié. On voit quelquefois accidentellement des rayons rouges isolés; il est bien rare que les arcs présentent les teintes rouge et verte des rayons. Les plaques nébuleuses n'ont jamais présenté de coloration.

L'heure moyenne des aurores colorées a été $10^h\ 11'$; c'est vers cette heure que les perturbations magnétiques occasionnées par l'aurore acquièrent leurs plus grandes amplitudes.

Distance de l'aurore. — Les observateurs, depuis Mairan, qui se sont occupés de l'aurore boréale, ont cherché à mesurer la hauteur au-dessus de la terre où ce météore avait lieu, en déterminant par la méthode des parallaxes la hauteur angulaire des diverses parties d'un arc, d'une couronne, ou des points remarquables ainsi éclairés dans différents pays.

L'aurore du 12 septembre 1621, observée par Gassendi à Peyniers, en Provence, fut aperçue en même temps dans tout le Dauphiné, à Bordeaux, à Dijon, à Paris, à Rouen, dans toute l'Europe, à Alep en Syrie, c'est-à-dire à près de 700 lieues de la France, vers l'orient.

L'aurore boréale du 19 octobre 1726 fut visible en même temps à Varsovie, à Moscou, à Saint-Pétersbourg, à Rome, à Naples, à Lisbonne, et même, selon quelques relations, à Cadix. En admettant que ce phénomène se fût présenté le plus près possible de l'horizon, on trouve, par le calcul, une valeur de 58 lieues ou plus de 200 kilomètres pour la hauteur au-dessus du sol du point où se coupent les deux tangentes que forment les rayons visuels des observateurs placés aux lieux les plus éloignés. Des évaluations faites depuis, ont donné les mêmes limites.

La commission française du nord avait établi, indépendamment de la station de Bossekop, une station à Jupvig pour effectuer ces déterminations. La comparaison des observations a conduit à cette conclusion, que l'aurore boréale avait offert sensiblement le même aspect dans les deux stations. M. Bravais, en faisant usage de sept couples d'observations simultanées, en a conclu que le siége des aurores boréales a généralement lieu à des hauteurs supérieures à 100000 mètres, et habituellement comprises entre 100000 et 200000 mètres ou entre 25 et 50 lieues vers les limites de notre atmosphère, et que les aurores sont soumises au mouvement de rotation et de translation de la terre.

Il reste un peu de doute sur ces évaluations, car on ne sait au juste si la position des diverses parties de l'aurore ne dépend pas en grande partie de la localité où se font les observations; ainsi le centre de la coupole étant le point de fuite des rayons auroraux parallèles à l'aiguille d'inclinaison, est un effet de perspective qui change avec la position de l'observateur; il peut se faire qu'il en soit de même de certaines parties des

couronnes. Il faudrait donc être certain, pour que ces déterminations eussent toute la rigueur désirable, que les observateurs des deux stations aperçussent au même instant les mêmes molécules éclairées par la cause inconnue qui donne lieu aux aurores boréales. Du reste, les différences que l'on a trouvées dans la mesure des angles, font que l'on ne peut répondre au juste de la parallaxe et par suite de la hauteur de l'aurore.

L'agitation des jets de lumière, le mouvement des arcs, la fluctuation continuelle de la matière des aurores, qui se replie sur elle-même, se déplie comme une matière floconneuse agitée par un vent léger; tous ces effets semblent donner de la vraisemblance à l'opinion généralement accréditée dans les régions septentrionales, que les aurores boréales font quelquefois entendre un bruissement plus ou moins fort. M. Biot, pendant son séjour aux îles Shetland, a recueilli de la part des habitants des témoignages unanimes de ce fait dont il n'a pas été témoin.

Les membres de la commission scientifique envoyée dans le nord ont observé 143 aurores boréales, sans qu'aucune fût accompagnée de bruissement, et cependant tous les habitants ont déclaré, comme ceux des îles Shetland et de Sibérie, que souvent ils l'ont entendu distinctement. Doit-on inférer de tous ces témoignages, pris dans des régions très-éloignées, que le météore descende quelquefois assez bas pour que le bruit qui l'accompagne soit entendu des observateurs, et même pour répandre une forte odeur de soufre autour d'eux, comme l'ont éprouvé des voyageurs en traversant les montagnes de Norvége, où ils ont été enveloppés par l'aurore boréale, au rapport de Bergmann? (Bergmann, *Opuscula physica*, t. V, p. 297.) C'est ce qui n'a été nullement constaté depuis par les savants; il est donc nécessaire que de nouvelles observations viennent éclairer ce point de météorologie.

M. Bravais, qui a été témoin d'une aurore dont les rayons paraissaient se prolonger au-dessous d'une

montagne, a attribué cette illusion à une réverbération des lueurs sur les facettes de neige de cette montagne; aussi il ne doute pas que l'illumination des nuages ou d'autres effets n'aient donné lieu aux illusions qui ont fait penser que l'aurore se trouvait près des observateurs.

§ III. — *Fréquence de l'aurore polaire.*

La commission scientifique du nord a observé qu'en 200 jours il y a eu 150 aurores boréales; mais il résulte d'un examen particulier, que les nuits sans aurores boréales ont été réellement des nuits exceptionnelles; ainsi aux pôles on peut donc dire qu'il y a en général des aurores tous les jours. L'apparition du météore a quelquefois lieu dès que la nuit commence. Cependant, il ne faut pas croire que l'aurore soit continuellement fixée au-dessus de l'horizon; quelquefois elle ne se montre qu'à une heure assez avancée de la nuit. Ordinairement, cependant, à mesure que la clarté crépusculaire diminue, l'aurore se présente à l'observateur, avec tous les signes capables d'indiquer qu'elle existait avant son apparition. Si l'on joint à cette circonstance, la disparition de l'aurore souvent retardée jusqu'à l'arrivée du jour, il est permis de croire que le météore existe souvent en plein jour.

La succession non interrompue du météore n'empêche pas qu'il ne reste soumis aux lois de la période diurne; ainsi l'apparition des arcs, des rayons ou des plaques, l'heure où les rayons se colorent et atteignent leur maximum d'éclat, etc., ne sont point réglées au hasard. La période diurne des phases successives est très-évidente, ainsi que les perturbations magnétiques qui les accompagnent. L'aurore commence par des arcs ou des rayons, quelquefois par l'apparition simultanée de ces deux types distincts. Quelques aurores n'offrent que des rayons sans aucune apparence d'arcs pendant toute la durée de la nuit; d'autres n'offrent que des arcs sans aucune trace de rayons: ces cas sont cependant assez rares. Mais les rayons colorés, partie la plus brillante du météore, agissant si puissamment sur l'ai-

guille aimantée, paraissent en général vers 10 heures du soir, et leur apparition est rare après 4 heures du matin; les plaques aurorales, au contraire, dominent pendant la seconde partie de la nuit; enfin les mouvements de palpitation appartiennent à la période de déclin.

En cherchant les époques moyennes de la première apparition des différentes parties de l'aurore boréale, M. Bravais a trouvé les nombres suivants :

1re apparition	des ars.......	7h 52′ du soir.
id.	des rayons....	8h 26′
id.	des plaques...	11h 18′
id.	lueurs vagues..	3h 32′ du matin.

Ces nombres ne sont que des moyennes, car le phénomène n'est soumis à aucune apparition rigoureusement régulière; les détails dans lesquels nous sommes entrés indiquent suffisamment la valeur qu'on doit y attacher sans que nous soyons obligés d'y revenir. Pour citer un dernier exemple, montrant les anomalies qui peuvent se présenter, nous dirons qu'une fois, le 18 février 1839, les palpitations ont paru à 7 heures du soir; mais il est probable que cette aurore n'était que la fin de la grande aurore boréale de la veille qui s'était prolongée dans le jour, comme le prouvent les perturbations magnétiques observées simultanément.

On a cherché si les mouvements de translation participent à la variation diurne, et si quelques-uns des faits généraux pouvaient être attribués, soit au mouvement de rotation de la terre, soit à son mouvement de translation dans son orbite. La discussion des observations a montré que le mouvement et que le sens du transport des lueurs ne sont astreints à aucune période diurne régulière. Cette remarque et d'autres rejettent l'hypothèse qui attribuerait l'aurore boréale à une matière cosmique, originairement étrangère à notre globe.

S'il existe quelque loi relative à la prédominance des mouvements dans tel ou tel sens, la seule que les obser-

vations permettraient de déduire, serait celle des mouvements du nord au sud, ou de l'ouest à l'est. La disposition relative de la mer et de la terre, près de Bossekop, serait-elle la cause de cette prédominance? Les lueurs tendraient-elles à se mouvoir de la première de ces régions vers la seconde, à s'irradier des mers polaires vers l'intérieur des continents? C'est à quoi l'on ne peut répondre actuellement. Plusieurs faits prouvent, en outre, que les aurores deviennent plus rares à mesure que l'on s'enfonce dans l'intérieur des terres, faits qui viendraient à l'appui de cette opinion.

Si dans les régions polaires les aurores sont fréquentes, et même ont lieu tous les jours, dans les latitudes moyennes elles sont moins fréquentes, et même ne se montrent que lorsque, dans les régions polaires, elles ont une certaine étendue. Quelquefois, comme on l'a déjà dit, ce météore a une étendue considérable, et si l'on fait attention qu'il peut s'en montrer vers les deux pôles de la terre, on voit que ce phénomène peut se manifester en même temps sur une grande partie du globe. Mairan, dans son traité, a rapporté tous les exemples d'aurores dont il a pu avoir des notions depuis l'an 500, jusqu'en 1731, dans les latitudes moyennes. Il a pu former ainsi le tableau de la page suivante. (Mairan, *De l'aurore boréale*, p. 213.)

On voit que dans les latitudes moyennes elles sont plus fréquentes en hiver qu'en été ; et quoique ce phénomène soit variable, cependant, il ne s'est pas montré toujours à peu près de la même manière. Ainsi, depuis 1716 jusqu'en 1731, pendant 16 années que l'on a suivi ces phénomènes, il y a eu plusieurs recrudescences; vers 1724, il y a eu fort peu d'aurores, seulement deux; et en 1728, elles ont été très-fréquentes. Mais jamais on n'en avait tant vu que dans le mois d'octobre de 1731, où il y en a eu, en moyenne, une sur trois jours. En moyenne, dans nos contrées, d'après le tableau suivant, il y aurait à peu près dix aurores boréales visibles par an.

AURORES boréales qui ont paru	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.	SOMME pour les années.
De 500 à 1550	»	5	1	»	»	»	1	2	3	7	3	5	27
1550 à 1622	2	7	1	2	»	1	»	1	3	6	4	1	28
1622 à 1707	1	»	»	»	»	»	3?	»	»	»	»	»	4
1707 à 1716	»	1	2	»	»	»	»	1	1	»	2	»	7
En 1716	»	»	2	3	»	»	»	»	»	»	»	2	7
1717	4	»	»	»	»	»	»	»	1	»	»	»	5
1718	»	»	1	»	»	»	»	»	4	1	1	1	8
1719	»	1	»	1	»	»	»	»	»	»	3	1	8
1720	1	3	1	»	»	»	»	1	2	»	1	1	10
1721	2	2	1	»	»	»	»	»	2	1	»	»	8
1722	4	1	»	»	»	»	»	»	4	4	1	1	15
1723	1	1	3	1	»	»	»	1	»	1	1	1	10
1724	»	»	1	»	»	»	»	»	»	1	»	»	2
1725	1	»	»	»	»	»	»	»	»	3	»	»	4
1726	»	»	»	»	»	»	»	»	1	3	3	»	7
1727	3	»	3	»	»	»	»	»	»	2	»	»	8
1728	»	4	3	3	»	1	3	3	4	6	3	»	30
1729	1	»	»	»	1	2	»	»	2	1	1	»	8
1730	1	2	1	2	»	1	»	»	2	4	3	»	16
1731	»	»	»	»	»	»	»	»	5	10	»	2	17
Sommes....	21	27	22	12	1	5	7	9	34	50	26	15	229

§ IV. — *Des diverses théories imaginées pour expliquer les aurores polaires.*

Halley supposa que l'aurore était due à des tourbillons magnétiques traversant la terre avec une excessive vitesse du sud au nord, et pouvant devenir lumineux par eux-mêmes ou par leur contact avec les substances terrestres qu'ils rencontrent. Mairan, qui rassembla toutes les observations faites jusqu'à lui sur ce sujet, partit du fait qu'il existe autour du soleil une espèce de matière lumineuse d'une ténuité extrême, et admit que l'aurore boréale n'était qu'une portion de cette vapeur, ou plutôt une portion de l'atmosphère solaire que la terre rencontrait sur sa route et emportait avec elle dans l'espace.

Cette théorie, présentée avec talent, fut adoptée par les savants jusqu'en 1740, époque où Celsius et Hiorter

découvrirent que les aiguilles aimantées éprouvaient une agitation extraordinaire lors de l'apparition des aurores. En rapprochant ce fait des effets lumineux de l'aurore boréale, qui sont semblables à ceux produits par l'électricité dans le vide, on supposa que l'électricité devait jouer un certain rôle dans la production du phénomène. Mais il ne suffisait pas de trouver une identité entre la lumière électrique et celle des aurores, il fallait encore démontrer l'existence d'une quantité suffisante d'électricité dans l'atmosphère ; c'est ce qui fut fait plus tard par Franklin et d'autres physiciens.

Dalton publia, en 1793, ses idées sur l'aurore boréale. Il supposa que le phénomène de l'aurore se passe à 150 milles d'élévation au-dessus de la surface de la terre. Il appela à son aide les effets électriques lumineux produits dans l'air plus ou moins raréfié, et donna une origine ferrugineuse aux rayons de l'aurore boréale en raison des propriétés magnétiques du fer. Il attribua à une illusion d'optique les jets de lumière qui semblent converger vers le méridien magnétique, attendu que ces rayons étant parallèles à l'aiguille d'inclinaison, doivent tendre vers un point situé dans le plan du méridien magnétique passant par l'œil de l'observateur. Lorsqu'un certain nombre de ces rayons sont amenés au-dessus de la tête de l'observateur, de manière à dépasser les points du ciel correspondant au méridien magnétique, la projection de tous ces rayons doit former sur la voûte céleste, autour de ce point, une couronne lumineuse dont les traits divergents paraissent descendre de toutes parts vers l'horizon, jusqu'à la hauteur apparente à laquelle les rayons météoriques sont descendus eux-mêmes par l'effet de leur mouvement progressif. Cette explication fut adoptée par Cavendish.

Dalton avança en outre que l'action exercée par l'aurore sur l'aiguille aimantée est dépendante de la hauteur au-dessus de l'horizon. Quand cette hauteur est très-grande, l'aiguille aimantée n'éprouve aucune espèce de perturbation. Quand l'aurore s'élève au-dessus du zé-

nith et même le dépasse, cette perturbation consiste en une oscillation irrégulière, tantôt à l'est, tantôt à l'ouest.

M. Biot a cherché à expliquer l'origine de la lumière aurorique, en admettant que ses éléments sont vraisemblablement, ou au moins en grande partie, composés de particules métalliques réduites à une extrême ténuité, et servant de conducteurs à l'égard des diverses couches atmosphériques chargées habituellement de quantités très-inégales d'électricité. Si donc de semblables colonnes se trouvent suspendues verticalement dans l'atmosphère, comme le sont les colonnes de l'aurore boréale lorsqu'elles flottent au-dessus des régions les plus voisines du pôle, l'électricité des couches d'air, situées au sommet et au bas de ces colonnes, trouvera en elles autant de conducteurs plus ou moins parfaits; et si la tendance de cette électricité pour se répandre uniformément, surpasse la résistance que l'imperfection des colonnes conductrices lui oppose, elle s'écoulera le long de ces colonnes en illuminant sa route, comme cela arrive avec des conducteurs discontinus. Quand cet écoulement s'opérera dans les parties très-élevées de l'atmosphère, où l'air, par sa rareté, offre peu de résistance au mouvement de l'électricité, il se fera silencieusement avec tous les accidents de lumière que l'on observe dans les tubes vides d'air; mais s'il vient à se propager jusqu'aux couches d'air inférieures, il faudra nécessairement qu'il y occasionne ce souffle et ces pétillements qui accompagnent, dit-on, l'aurore boréale lorsqu'elle descend jusqu'à la surface de la terre. Enfin, le météore ne devenant visible que par cette cause accidentelle, il pourra exister dans l'air et agir sur l'aiguille aimantée sans être aperçu. Il est possible encore qu'il ne brille qu'en certaines parties, et qu'il reste obscur dans tout le reste; tandis que dans d'autres cas, la rupture de l'équilibre électrique étant subite et générale, toute la colonnade météorique s'illumine en un moment. Ces phénomènes devront s'affaiblir à mesure que les nuages météoriques s'avanceront au-dessus des contrées plus méridionales, non-seulement à

cause de l'extension qu'ils pourront y prendre, mais surtout parce que les colonnes conductrices, devant se conformer toujours à la direction de l'aiguille aimantée, deviendront de plus en plus horizontales, auront ainsi leurs deux extrémités placées dans des couches d'air moins distantes, par conséquent chargées de quantités d'électricité moins inégales, et auxquelles, en outre, une humidité habituellement plus grande donnera plus d'occasions de se décharger. M. Biot pense que les particules conductrices très-ténues peuvent être émises par des volcans en activité près du pôle. Il cite l'exemple de ces brouillards, notamment en 1783, qui ont couvert toute l'Europe, et aussi les exemples de brouillards lumineux.

Il est bien difficile d'admettre de semblables bases et de supposer la nue de l'aurore composée en grande partie de particules métalliques réduites à un état de ténuité extrême, car les matières gazeuses liquides ou solides vomies par les bouches volcaniques sont presque toujours des matières brûlées et dépourvues de conductibilité, du moins en grande partie; dès lors, nous ne trouvons plus là la conductibilité électrique nécessaire pour que les colonnes, lorsqu'elles flottent au-dessus des régions septentrionales, puissent servir à opérer la décharge entre les diverses parties de l'atmosphère électrisées à des degrés très-différents, d'où résulte une illumination qui se répand au loin. En outre, il faudrait que les recompositions électriques ne se fissent pas dans le sens des rayons auroraux, sans quoi ils ne devraient pas être parallèles à l'aiguille aimantée.

M. Kaemtz rattache les aurores boréales à des effets par induction se manifestant dans l'atmosphère et produits par des changements dans l'intensité magnétique du globe; ces changements seraient dus aux variations de température ou à tout autre motif. Cette hypothèse est bien difficile à admettre, car on ne voit pas comment ces effets peuvent se manifester dans des corps non conducteurs de l'électricité.

Nous n'avons rappelé les diverses opinions émises

touchant l'origine de l'aurore boréale que pour montrer l'incertitude où l'on est à cet égard. Aucune hypothèse ne rend compte des faits d'une manière satisfaisante; cependant, on ne peut s'empêcher de remarquer que tous les faits observés jusqu'ici montrent que les rayons ou colonnes de l'aurore boréale obéissent à l'action du magnétisme terrestre, et peuvent être considérés par conséquent comme ayant de l'analogie avec ces jets lumineux produits dans l'expérience de Davy, lorsqu'on fait passer dans le vide, entre deux pointes de charbon, la décharge d'une forte batterie voltaïque; ces jets lumineux obéissent en effet à l'action d'un barreau aimanté. Il peut donc se faire, d'après cela, que les rayons lumineux de l'aurore soient des traînées de matières gazeuses transportées par l'électricité, et capables de prendre toutes les formes; mais avec cette condition toutefois, que les recompositions électriques se fassent perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison, ou perpendiculairement aux colonnes lumineuses boréales. Comment sont produits ces espèces de courants électriques (voyez p. 547)? Nous l'ignorons. Il y a tant de moyens de mettre en mouvement l'électricité, qu'il peut très-bien se faire que la nature, dans cette circonstance, en ait à sa disposition qui ne nous soient pas connus.

SECTION II.

DES ÉTOILES FILANTES, DES BOLIDES ET DES AÉROLITHES.

Étoiles filantes. — Ce que l'on appelle communément étoiles filantes sont des traînées lumineuses que l'on aperçoit par des nuits sereines, sous la forme d'une étoile plus ou moins brillante qui se meut dans l'espace et qui s'éteint rapidement; il est probable que, suivant leur dimension et leur proximité, ces météores deviennent des bolides ou des globes enflammés.

Il est très-difficile d'avoir des données positives sur la hauteur au-dessus de la terre où le phénomène se produit, en raison de la difficulté de mesurer la parallaxe; néan-

moins dans quelques circonstances fortuites on a pu le faire. Il résulte des observations que la hauteur où ces météores commencent à briller est très-inégale, et peut aller jusqu'à 200 lieues. Ainsi, d'après les théories actuelles, ils deviendraient lumineux à une distance telle, qu'ils seraient hors de la limite de notre atmosphère.

Les étoiles filantes se dirigent ordinairement vers la terre; cependant on a des exemples qui montrent que quelquefois elles cheminent horizontalement, et même qu'elles remontent; on en a observé qui décrivaient un demi-cercle en s'élevant ou en descendant. Brandes a reconnu que ces météores avaient une tendance à se diriger vers le sud-ouest, tendance due à la combinaison de leur mouvement avec celui de la terre. Ainsi, le plus habituellement, leur direction est diamétralement opposée au mouvement de translation de la terre dans son orbite.

Quoique les étoiles filantes et les bolides se montrent dans tous les mois de l'année, cependant il s'en faut de beaucoup qu'ils apparaissent en même nombre aux diverses époques; on peut s'en convaincre en lisant les relations des personnes qui furent témoin en Amérique, dans la nuit du 12 au 13 novembre 1833, de l'étonnante apparition d'étoiles filantes; elles se succédaient à de si courts intervalles qu'on ne pouvait les compter; on a évalué leur nombre à plusieurs centaines de mille. (Arago, *Ann. du Bureau des longitudes*, 1836.) Tous ces météores furent aperçus en Amérique, sur la côte orientale, de 9 heures du soir jusqu'après le lever du soleil, où dans quelques endroits le phénomène fut encore visible; ils semblaient partir du point vers lequel la terre se dirige dans sa révolution annuelle, puis divergeaient dans toutes les directions.

En Europe, en 1832, du 12 au 13 novembre, on fut également témoin d'une apparition analogue, mais sur une échelle moindre. On se rappela alors un phénomène aussi extraordinaire observé, en Amérique, par M. de Humboldt, du 11 au 12 novembre 1799. Cette presque identité de dates, et les observations d'étoiles filantes

dans quelques localités entre le 10 et le 15 novembre, ont fait penser qu'autour du soleil circule une zone composée de millions d'astéroïdes ou de petits corps dont les orbites rencontrent le plan de l'écliptique vers les points que la terre va occuper tous les ans à cette époque.

Il paraîtrait que dans quelques endroits, des phénomènes analogues ont été observés vers le 10 ou 11 août, et vers le 20 ou 24 avril.

Les étoiles filantes ne se montrent pas seulement aux époques dont il vient d'être question; on en voit encore les autres jours de l'année, mais leur nombre est beaucoup moins grand; on peut donc dire que ces météores se présentent continuellement à nous. MM. Brandes et Bensembergs en ont porté le nombre moyen à huit par heure. M. Quetelet, qui s'est occupé de la même question, a été conduit à un résultat analogue; suivant lui, un observateur isolé ou plusieurs observateurs examinant une même région du ciel, peuvent voir, terme moyen, huit étoiles filantes par heure, et plusieurs observateurs, placés de manière à embrasser tout l'horizon, peuvent en compter un nombre double. M. Olbers pense que le nombre de huit étoiles ne peut s'appliquer qu'aux observations faites du mois d'août au mois de décembre; d'après lui, le nombre moyen, pour toute l'année, ne serait que les deux tiers de celui de M. Quetelet; suivant M. Herschel, ce nombre serait également au-dessus de la moyenne. D'après les calculs de M. Herrick, le nombre donné par M. Quetelet serait trop faible; tout ce que l'on en pourrait conclure, c'est que les étoiles filantes se sont montrées en Amérique plus nombreuses qu'en Europe.

Il résulte des déterminations faites par M. Quetelet, que la valeur moyenne de la vitesse des étoiles filantes est à peu près de six lieues par seconde. C'est sensiblement la vitesse de translation de la terre autour du soleil. Au surplus, nous renvoyons, pour la discussion relative à l'apparition des étoiles filantes, au Mémoire de M. Quetelet. (*Mémoires de l'Académie des sciences et belles-lettres de Bruxelles*, t. XII.)

Globes enflammés. — Des calculs approximatifs ont montré que les globes enflammés n'apparaissent pas également dans chaque mois; ils sont plus fréquents en novembre que dans les autres mois, comme les étoiles filantes, et leur nombre est moins grand en juin, peut-être en raison de la prolongation du jour qui empêche ces météores d'être aperçus.

Les globes enflammés ont un éclat supérieur à celui de la lune, la lumière est d'un blanc éblouissant ou rougeâtre, quelquefois on y distingue encore d'autres couleurs. Les apparences sous lesquelles ils se montrent tendent à prouver qu'ils sont formés de matière inflammable, car, en traversant l'atmosphère, ils lancent de toutes parts de la flamme, des étincelles et de la fumée. La combustion paraît se ralentir parfois, puis s'aviver après avoir répandu beaucoup de vapeur et de fumée; leur volume augmente, et ils finissent par éclater, soit en l'air, soit à la surface du sol. Ces globes, en tombant à terre, rebondissent et éclatent en produisant de terribles détonations accompagnées de vapeur et de fumée. L'explosion est accompagnée ordinairement d'une chute de pierres appelées aérolithes.

Aérolithes. — Les aérolithes et les pierres météoriques sont recouverts d'un enduit noirâtre, scorié, d'une nature absolument semblable à celle du noyau; cet enduit imite celui qu'on appliquerait avec un vernis. Néanmoins, quoique ce soit là le cas le plus ordinaire, les pierres météoriques ont quelquefois l'éclat métallique de la fonte ou l'aspect du bitume; dans quelques morceaux on rencontre des veines et des taches semblables à l'enduit. Ces substances n'ont aucune analogie avec les produits volcaniques, sous le rapport de l'aspect et de la composition.

On a fait un grand nombre d'analyses d'aérolithes : quelques-uns de ces corps ne renferment que du fer métallique; les autres, comme M. Gustave Rose l'a montré, sont formés de substances diverses, telles que probablement du feldspath opalin (labrador), du pyroxène, etc. Réduits en poudre, on en retire, avec un aimant, du fer

et du nickel. Voici les principes constituants que l'analyse chimique y a découverts : de l'oxygène, de l'hydrogène, du soufre, du phosphore, du carbone, de la silice, du chrôme, du potassium, du sodium, du calcium, du magnésium, de l'aluminium, du fer, du manganèse, du nickel, du cuivre et de l'étain. Ces éléments sont combinés de diverses manières; M. Berzélius, dans un travail qu'il a fait à ce sujet, a adopté les types principaux suivants de combinaison : 1° fer métallique renfermant de petites quantités de nickel, de cobalt, de magnésium, de manganèse, d'étain, de cuivre, de soufre et de carbone; 2° sulfure de fer; 3° fer magnétique; 4° olivine formant la moitié du résidu obtenu, quand on a enlevé le fer et le nickel avec un aimant; 5° silicates et diverses substances terreuses, parmi lesquelles on distingue le pyroxène; 6° chromate de fer en petite quantité; 7° oxyde d'étain.

Les masses météoriques que nous avons signalées précédemment se montrent dans diverses contrées; nous citerons particulièrement celle que découvrit Pallas en Sibérie, en 1771, et qui pesait 700 kilogrammes. Diverses contrées de l'Europe, le cap de Bonne-Espérance, le Mexique, le Pérou, la baie de Baffin, nous présentent également des masses de fer météorique. Ce fer est criblé de cavités remplies d'olivine; il renferme 90 pour 100 de fer et quelques centièmes de nickel.

Origine des étoiles filantes et des aérolithes. — Différentes hypothèses ont été émises pour remonter à l'origine des étoiles filantes et des bolides : on les a considérés d'abord comme des produits de nos volcans ou des volcans de la lune. La première hypothèse a été facilement écartée, en raison de la différence qui existe dans la composition des pierres météoriques et des laves. La seconde hypothèse a été soutenue par M. Laplace, qui a cherché à démontrer que des pierres projetées par les volcans de la lune pouvaient entrer dans la sphère d'activité de la terre et tomber sur sa surface; et que si elles avaient une vitesse initiale de 3250 mètres

par seconde, alors il leur faudrait deux jours et demi pour nous arriver. Cette opinion a été combattue par Olbers.

Plusieurs physiciens ont avancé que ces météores pouvaient bien avoir une origine atmosphérique ; ils supposent qu'un grand nombre de substances se trouvent dans l'air à l'état de vapeurs en quantités excessivement faibles à la vérité, et s'appuient sur la présence d'un nuage sombre ou brillant, ou de bandes blanches se réunissant en une seule masse lors de la formation des météores ignés. Il faudrait donc admettre que ces vapeurs puissent se condenser avec production de lumière, et que des forces dont nous ignorons la nature les poussassent dans des directions souvent opposées à celles de la pesanteur. On a fait alors intervenir l'électricité dans cette circonstance, comme on le fait toujours quand on a besoin de forces occultes pour expliquer des phénomènes dont la cause est inconnue; cette hypothèse est inadmissible.

Enfin on a mis en avant l'origine cosmique, et celle-là est la plus probable. Cette opinion consiste, comme nous l'avons déjà dit, à considérer les météores en question comme des corps se mouvant dans l'espace, et que la terre attire quand ils se trouvent dans sa sphère d'activité. Chladni, qui s'est beaucoup occupé de cette question, a adopté cette origine. On admet alors, pour expliquer la périodicité des aérolithes, l'existence d'une zone composée de milliers de petits corps, dont les orbites rencontrent le plan de l'écliptique vers le point que la terre va occuper tous les ans du 11 au 13 novembre.

Suivant Olbers, une immense quantité de corpuscules planétaires, formant les étoiles filantes, paraît se mouvoir dans des orbites autour du soleil, et traverse celle de la terre entre 18 et 21° du Taureau. Ces orbites, très-rapprochées et presque parallèles entre elles, forment, pour ainsi dire, une route commune pour des millions, des myriades de ces astéroïdes infiniment petits, et qui en des temps à peu près égaux, dans un espace de cinq ou six années peut-être, achèvent leur révo-

lution autour du soleil. Sur cette route, comme ils paraissent encore très-inégalement répartis, ici ils sont en masse épaisse, là ils sont disséminés. Dans les années 1799 et 1833, et peut-être aussi en 1832, l'une de ces masses aura été jetée dans notre atmosphère; durant les années 1831, 1834 et 1836, il est probable que notre globe n'a rencontré que des astéroïdes, étoiles filantes isolées, quoiqu'elles fussent en assez grande quantité.

Il est à croire que ces astéroïdes deviennent visibles pour nous, lorsque, par leur mouvement, combiné avec celui de la terre, nous nous trouvons près des endroits où ils sont situés : ils nous apparaissent alors sous forme d'étoiles filantes; mais s'ils arrivent près de terre, ils prennent l'apparence de bolides, et se présentent à nous sous la forme d'un gros globe de feu animé d'une grande vitesse, laissant sur sa route une traînée de lumière qui peut persister pendant plusieurs minutes; ce globe éclate ensuite et donne lieu aux aérolithes qui sont projetés à diverses distances.

Si l'on se rend compte facilement comment la terre peut rencontrer sur sa route des astéroïdes qu'elle attire à elle, il n'en est pas de même de l'incandescence qui résulte de leur passage au travers de l'atmosphère. Il est nécessaire alors d'admettre qu'ils sont composés de matières oxydables, qui s'échauffent, puis s'enflamment par suite de la résistance de ce fluide quand elles traversent l'air avec une grande vitesse.

On a également avancé que les parties constituantes des pierres météoriques sont le silicium, le magnésium, le calcium, le potassium, etc., et que les effets produits pourraient résulter de l'action de ces éléments sur la vapeur d'eau qui se trouve sur le passage du météore.

SECTION III.

§ Ier. — *Brouillards secs.*

On désigne sous ce nom des brouillards dont l'origine n'est pas bien connue, et auxquels on ne reconnaît pas

pour causes de leur formation celles que nous avons énoncées en parlant des nuages, page 375 et suivantes. Ce phénomène est fréquent en Allemagne et en Hollande; quelques personnes l'attribuent à la combustion de la tourbe, combustion qui s'opère de telle manière qu'il y ait beaucoup de fumée et peu de flamme; quand l'air est sec, la vapeur aqueuse est promptement enlevée, et il ne reste que les matières solides. Ce qui a porté à penser que c'était peut-être là l'origine de ces brouillards, c'est que, dans les contrées que nous venons d'indiquer, la présence de ce météore coïncide avec la combustion de la tourbe ou avec les incendies des grandes forêts.

Doit-on rapporter à la même cause le brouillard sec de 1783, qui s'étendit sur une grande partie de l'Europe? Parmi les hypothèses qui ont été mises en avant pour expliquer sa production, nous citerons l'origine volcanique, par la raison que, cette même année, il y eut un violent tremblement de terre en Calabre et une éruption volcanique en Islande. On a fait observer également que, dans les années 526, 1721, 1822 et 1834, l'apparition de brouillards secs très-intenses a cadré avec des éruptions volcaniques. D'après cette hypothèse, on attribuerait donc ce météore aux cendres volcaniques qui sortent du cratère avec une grande quantité d'eau, ou à la fumée produite par la carbonisation des matières végétales que rencontre la lave en coulant sur le flanc du cratère. Pour se faire une idée de l'immensité du nuage de fumée qui s'élève dans l'air par l'effet de cette combustion, nous citerons une éruption d'Islande dont la lave a détruit dix-sept villages et a brûlé tous les végétaux qui couvraient un sol assez étendu, et dont la fumée, transportée par les vents du nord, se répandit dans une grande partie de l'Europe. Enfin on a attribué aux brouillards une origine cosmique, en supposant que la terre ait traversé des queues de comète; mais rien n'autorise à penser qu'il en ait été ainsi, et, jusqu'à présent, on doit s'en tenir aux deux premières hypothèses.

§ II. — *Pluies extraordinaires.*

Quelquefois on a prétendu qu'il était tombé du soufre en même temps que la pluie; mais depuis que l'on a examiné avec attention la nature des produits jaunâtres qui se montrent à la surface des eaux tranquilles dans cette circonstance, on a reconnu que ce n'était autre chose que du pollen de plusieurs espèces de végétaux en fleur, entre autres, de l'aune, du noisetier, du sureau et du pin.

Les pluies de sang ont une origine analogue; les matières qui colorent souvent en rougeâtre les gouttes de pluie ne sont autres que des matières organiques, des sables colorés par le fer, etc. Les dépouilles des papillons, dont la chenille ronge l'ortie, donnent sur les murailles des taches rougeâtres que l'on a prises également pour des taches de sang. (Cotte, *Traité de météorologie*, page 51.)

Les pluies de grains n'ont pas plus de réalité que les pluies précédentes. Un examen attentif a montré que lorsque la terre, après la pluie, a paru couverte de petits corpuscules qui ressemblaient au froment, ce n'était autre chose que des petits tubercules qui se forment aux racines d'une espèce de renoncule : ces tubercules sont desséchés au printemps et une forte pluie les amène dans les parties basses en les gonflant de façon à leur donner l'apparence de petits grains de céréales.

Quant aux animaux qui accompagnent quelquefois les pluies, on peut leur attribuer une double origine : ils sont enlevés par le vent ou par des trombes que l'on sait dessécher des mares, ou bien ils sortent de terre quand celle-ci est convenablement humectée.



APPENDICE.

CHAPITRE PREMIER.

DE L'ALTÉRATION DES ROCHES SOUS LES INFLUENCES ATMOSPHÉRIQUES OU AUTRES.

Tout le monde sait qu'il s'est opéré jadis, et qu'il s'opère encore de nos jours, à la surface et à l'intérieur du globe, mais sur une échelle beaucoup moins étendue que dans les premiers temps, une foule de changements, dus à des causes physiques ou chimiques, qui ont été fréquemment accompagnés d'effets électro-chimiques, dont on n'a commencé à connaître l'importance que depuis un petit nombre d'années. La chaleur, la lumière, l'électricité, l'eau et l'air, agissent successivement ou simultanément pour opérer ces changements; mais l'eau et l'air sont les plus grands agents destructeurs, qu'on les envisage sous le point de vue physique ou chimique. L'eau produit des effets qui varient suivant qu'elle est en mouvement ou en repos, et suivant les substances qu'elle tient en dissolution. L'eau salée, dont nous avons fait connaître la composition, contient un grand nombre de sels, et particulièrement du chlorure de sodium; celle de certains lacs renferme également des chlorures, et en outre du carbonate de soude et d'autres sels qui produisent des efflorescences dans les grandes chaleurs. Les eaux-douces ont nécessairement une action plus bornée : prises à peu de distance de leur source, leur composition est sensiblement la même; mais à mesure

qu'elles s'en écartent, elles sont modifiées; peu à peu, elles laissent déposer les substances qu'elles tenaient en suspension ou en solution, en raison d'une moindre vitesse, de l'évaporation, ou d'un abaissement de température; puis elles enlèvent au sol sur lequel elles coulent de nouveaux principes et des matières organiques qui, s'y décomposant, leur fournissent des composés restant en dissolution. Les composés solubles qu'elles renferment le plus habituellement sont les chlorures alcalins et terreux, qui vont se joindre aux sels que la mer contient déjà.

L'air agit de même comme force mécanique et comme force chimique. Sec et calme, il est absolument sans action sur les roches; humide, c'est l'inverse. L'eau, à l'état de pluie, précipite sur la surface de la terre les matières pulvérulentes tenues en suspension dans l'air.

L'air et l'eau, avons-nous dit, renferment les éléments les plus actifs des réactions chimiques terrestres : l'air, fournit de l'oxygène et de l'acide carbonique; l'eau, de l'oxygène quand elle est décomposée, de l'acide carbonique et différentes substances qu'elle tient en solution. A l'état de vapeur, l'action de l'eau est des plus actives, parce qu'elle mouille toutes les surfaces. Le fer, si répandu dans la nature, est l'élément qui reçoit le premier les effets de l'action combinée de l'air et de l'eau; en passant à l'état d'hydrate de peroxyde, il entraîne la décomposition des substances qui le renferment.

Nous ne reviendrons pas sur les vues que nous avons exposées touchant la formation des roches cristallisées ou d'origine ignée, et des roches sédimentaires ou d'origine aqueuse. Nous nous bornerons à dire, en ce qui concerne les dernières, que les dépôts qui s'opéraient dans les premiers temps, au fond des mers, ont été soumis successivement à une forte pression, provenant du poids des couches supérieures, pression qui a dû exercer une grande influence sur la cohésion des parties et les réactions subséquentes.

Nous allons passer en revue les principaux phéno-

mènes de décomposition, en commençant par les roches d'origine ignée, et nous verrons ensuite quels sont les moyens dont la physique et la chimie peuvent disposer pour les reproduire.

SECTION Ire.

DE L'ALTÉRATION DES ROCHES.

---

§ Ier. *Du granit.*

Cette roche, formée de feldspath de mica et de quartz, suivant la composition du feldspath s'altère sous l'influence des agents atmosphériques; ainsi le granit des Alpes n'éprouve aucune altération bien sensible, tandis que celui d'Auvergne est tantôt intact, tantôt en décomposition légère, tantôt en décomposition complète. On a remarqué que le granit qui renferme des feldspaths magnésien et calcaire résiste plus fortement à la décomposition que celui qui est à base de potasse.

Le feldspath entraîne, en se décomposant, la désagrégation de la roche. Le produit de la décomposition est le kaolin, qui forme souvent des amas considérables, et dont la texture est quelquefois celle du feldspath. Cette substance renferme souvent du quartz et du mica qui ont résisté à l'action décomposante.

M. Berthier a prouvé que la potasse n'est pas le seul corps enlevé dans l'acte de la décomposition, et qu'il s'échappe encore de la silice, c'est-à-dire que le feldspath perd un silicate de potasse et se transforme en un silicate d'alumine, dans lequel les proportions de silice et d'alumine ne sont plus les mêmes que dans le feldspath.

M. Fournet, qui a étudié la formation du kaolin dans les filons, dans les parties inférieures des basaltes, et à la surface du sol, à Pontgibaud, a constaté que cette substance provient bien des granits, gneiss et basaltes décomposés superficiellement dans leur place originaire.

En suivant l'altération de ces roches, depuis la surface du sol jusqu'à une certaine profondeur, il a trouvé : 1° une zone supérieure, de couleur jaune ou rouge, due à la suroxydation du fer; 2° une zone mitoyenne, de couleur verte très-prononcée; 3° une zone inférieure, offrant tous les caractères d'un granit intact, mais qui se désagrége complétement au moindre choc; enfin, au-dessous, en liaison intime avec la précédente zone, le granit est solide et non altéré. On voit donc que la décomposition de ces roches a été successive et a commencé par la partie la plus voisine du sol; dès lors elle est due aux influences atmosphériques.

Dans les Vosges, on a remarqué que le granit est profondément désagrégé, près de son contact avec les formations secondaires; cet effet est probablement dû en partie à ce qu'au contact du granit et des roches secondaires, il existe des solutions de continuité qui favorisent les infiltrations des eaux, et par suite l'action des agents atmosphériques.

M. Fournet envisage comme il suit la décomposition des granits; il admet que la masse a été successivement désagrégée par un effet de dimorphisme qui a changé la texture cristalline. Il faut donc supposer que les parties constituantes de ces roches, lors de leur formation, se trouvaient dans un état d'équilibre instable qu'elles ont perdu peu à peu, par l'effet du refroidissement et des influences atmosphériques. On est assez disposé à partager cette opinion, quand on examine attentivement ce qui se passe dans les basaltes et les phonolithes. On voit d'abord une série de petites taches grises, plus ou moins rapprochées et rayonnantes, qui résultent d'une division extrême des parties et ne peuvent provenir que des effets de contraction et de dilatation, lesquels divisent ordinairement la masse sans la porphyriser. L'altération continuant toujours, la masse se divise en une multitude de fissures, dirigées ordinairement suivant trois plans rectangulaires qui déterminent une désagrégation totale cuboïde, ou plutôt sphérique, par l'émoussement des angles.



L'exfoliation, par couches concentriques, survient après, par suite du gonflement de la masse. L'état de désagrégation des diverses parties qui se détachent est tel, que les agents chimiques qui se trouvent dans l'air, ou à la surface de la terre, les attaquent facilement et les convertissent en un corps argiloïde coloré par le fer.

Au surplus, il n'est pas invraisemblable que les molécules des roches d'origine ignée prennent, à l'instant de leur solidification, un état d'équilibre instable, qui se perd peu à peu pour faire place à un autre plus stable, car M. Gustave Rose a trouvé un dimorphisme dans les pyroxènes et les amphiboles, soumis à un refroidissement brusque ou à un refroidissement lent. Ne sait-on pas aussi que les pyrites cristallisent sous deux formes, l'une cubique, l'autre prismatique? Celle-ci ne serait-elle pas une forme instable, attendu qu'elle est sujette à l'efflorescence, tandis que la première résiste mieux à la décomposition? Le grenat et l'idocrase, dont la composition chimique est la même, cristallisent sous deux formes différentes : le grenat paraît être la forme instable, puisqu'il se décompose dans quelques localités; l'idocrase, au contraire, n'éprouvant jamais de décomposition, serait la forme stable.

La désagrégation de la roche une fois effectuée, le fer s'oxyde graduellement, en passant à l'état de protoxyde incolore, d'oxyde vert intermédiaire et d'hydrate de peroxyde.

Lorsque le feldspath compacte commence à s'altérer, la surface prend une teinte légèrement rosée, et acquiert en même temps une faible saveur saline, qui ne se manifeste plus quand l'altération est plus avancée. L'alcali est mis en liberté par l'affinité qu'exerce sur lui l'acide carbonique de l'air; la silice se présente alors à l'état gélatineux, qui lui permet de se dissoudre en certaines proportions dans les eaux et dans les carbonates alcalins. Cette silice, entraînée par les dissolutions, donne naissance à des cristaux de quartz hyalin, à des fiorites, des agates, des opales, des concrétions de calcédoine, à des silicates

de nouvelle formation, tels que mésotypes, chabasies, etc.

L'acide carbonique, en dissolution dans les eaux, est capable d'exercer des réactions énergiques sur des roches granitiques. Dans la vallée de Châtel-Guyon, en Auvergne, les nombreuses sources d'eaux minérales, chargées de gaz acide carbonique, qui s'échappent de toutes les fissures du granit, exercent une action dissolvante si puissante, qu'elles creusent cette roche, et y forment de petits bassins irréguliers qu'elles remplissent de fer hydraté. Dans un des filons de Pontgibaud, une explosion de poudre fit sortir un jet d'eau très-violent, chargé de gaz acide carbonique fortement condensé. L'eau, dans les premiers moments, était surchargée d'une matière argileuse blanche, tenue en suspension. Cette eau avait traversé une masse de baryte sulfatée qui était altérée, sur une certaine épaisseur, à un tel point, que la forme cristalline de la baryte était mise à nu comme dans le moiré métallique. Ces mêmes eaux avaient attaqué aussi des fragments de stéaschistes empâtés dans le feldspath. L'altération était si complète, qu'il ne restait plus que les grains quartzeux et les lamelles talqueuses. Les eaux vitrioliques, en agissant sur le feldspath et autres roches ignées, peuvent aussi donner naissance à des hydro-silicates d'alumine.

§ II. *Altération des laves et des produits volcaniques.*

On a observé, à la Chaussée des Géants, que le calcaire qui est en contact avec le basalte a une cassure brillante, une dureté plus grande et une pesanteur spécifique qui a sensiblement augmenté, sans qu'il y ait changement dans la composition. Il est probable que le basalte, quand il est venu s'épancher à la surface du globe, ayant une température très-élevée, a modifié le mode d'agrégation du calcaire sans changer ses parties constituantes. Hall a obtenu un effet de ce genre en soumettant, dans l'eau, un morceau de craie à une température élevée, sous une forte pression : la craie a été changée en chaux carbonatée à grains cristallins.

Le granit qui se trouve dans le voisinage des filons

de basalte a éprouvé aussi une décomposition, comme on en cite des exemples dans les îles d'Ecosse et aux environs de Clermont. Les schistes argileux, en contact avec le basalte, ont été changés en schiste siliceux; les substances métalliques ont été sublimées, l'argile fondue, etc.

Les laves, comme les granits, ne se décomposent pas toutes sous l'influence des agents atmosphériques; celles des volcans éteints sont pour la plupart intactes, comme l'Auvergne et le Vivarais en fournissent de nombreux exemples. Il n'en est pas de même des laves du Vésuve, qui se décomposent assez rapidement, et dont les parties constituantes aident puissamment à la végétation. Cette différence dans les effets produits doit être attribuée à la composition de ces laves. En Auvergne, les laves à base de pyroxène se décomposent plus vite que les laves labradoriques.

On trouve souvent, dans les basaltes et autres roches d'origine ignée, des produits qui ont été formés après la consolidation de la masse, et dès que leur température a été suffisamment abaissée; car la plupart de ces composés sont altérés par une chaleur incandescente et renferment de l'eau de cristallisation, qui peut être enlevée par une température peu élevée.

§ III. *Des effets de décomposition dans les filons.*

Les parties les plus rapprochées de la surface du sol sont dans un état de décomposition que l'on ne retrouve pas dans les parties inférieures. De même, les portions qui sont en contact avec une roche perméable à l'eau, qui peut les mettre en communication avec les agents atmosphériques, éprouvent des changements semblables.

Ces effets sont surtout marqués dans les filons de galène; les carbonates, ainsi que les oxydes, les hydrates, occupent les parties du filon les plus voisines du sol, ou celles qui sont en rapport avec des substances argileuses ou roches fendillées qui laissent facilement passer les eaux. Il n'est donc pas permis de douter que le sul-

fure n'ait été oxydé par l'influence prolongée des eaux pluviales. Pour en avoir la preuve, il suffit d'exposer à l'air une masse bocardée de galène; on ne tarde pas à sentir une odeur de gaz sulfureux, qui est surtout très-marquée lorsque, après une pluie, le soleil brille. Pendant le grillage naturel, le plomb et le soufre s'oxydent; il se forme, d'une part, du carbonate, et, de l'autre, du sulfate de plomb en quantités assez grandes pour produire dans la fonte des pertes notables au bout d'un certain temps. Dans les parties voisines du toit du filon, on trouve du carbonate, des cristaux de sulfo-carbonate, et du plomb noir, produits résultant de l'influence exercée sur la galène par les agents atmosphériques.

La décomposition graduelle du fer spathique dans son gisement est due à une cause semblable. A Vizille, département de l'Isère, où il existe de grands amas de cette substance, on a établi des galeries les unes au-dessus des autres, qui ont permis de reconnaître que la décomposition est d'autant plus grande, que le minerai est plus rapproché du sol, c'est-à-dire, qu'il éprouve davantage l'action de l'air, de l'eau et des agents atmosphériques. A une certaine profondeur, le minerai est intact.

Le minerai décomposé renferme toujours des carbonates de manganèse et de magnésie en diverses proportions. Quand la décomposition commence, le minerai prend assez promptement une teinte jaunâtre ou brune, et se change en un mélange de peroxyde et d'hydrate de peroxyde de fer. Il paraît, comme l'a avancé M. Berthier, que le fer et le manganèse, en se suroxydant et se changeant pour la plus grande partie en hydrate, abandonnent leur acide carbonique, qui se porte sur le carbonate de magnésie, et le transforme en bicarbonate soluble, que les eaux entraînent facilement.

Le filon d'Huelgoat, en Bretagne, va nous révéler une foule de réactions chimiques intéressantes à connaître pour la physique du globe. Ce filon a pour roches encaissantes des schistes à débris coquilliers, un porphyre

quartzifère, un pouddingue porphyrique très-perméable à l'eau, des schistes alumineux et pyritifères, une brèche pyriteuse amphibolique et feldspathique contenant des veines de carbonate de chaux, etc. Les matières qu'il renferme, ainsi que les roches encaissantes, sont d'autant plus altérées qu'elles sont plus rapprochées de la surface du sol. La partie supérieure du filon est composée d'un quartz carié plus ou moins ferrifère, renfermant du chlorure d'argent, de l'argent métallique et des pyrites cuivreuses argentifères; ce minerai est analogue au pacos des minerais d'argent d'Amérique. La partie inférieure renferme principalement des galènes; le quartz carié est d'autant plus riche qu'il est plus rapproché du plomb.

Les pacos renferment dans la partie inférieure, près de la galène, du plomb phosphaté à l'état de concrétion, ou en houppes soyeuses : c'est là aussi où se trouvent les plombs carbonatés et une substance gélatineuse, qui remplit les géodes dans lesquelles les phosphates et les carbonates se sont déposés. Il y a très-peu de carbonate de plomb dans l'affleurement du filon; on y trouve seulement du plomb sulfaté et du sulfo-carbonate, ainsi que du plomb noir. On rencontre le plomb-gomme à la jonction des masses de galène et de pacos. Au milieu des pacos, non loin des sulfo-carbonates, se montre le fer résinite, dont la formation est bien moderne. L'alun de plume abonde au toit du filon; il provient de la décomposition d'une roche alumineuse et pyritifère, appelée roche verte, qui semble faire partie du filon. Les schistes pyriteux, en se décomposant, produisent des cristaux de sulfate de fer. Les eaux en sortant de la roche encaissante sont peu vitrioliques, mais elles le deviennent successivement; elles renferment en outre du chlorure de sodium. Enfin les porphyres, dans le voisinage du filon et de l'atmosphère, sont décomposés et amenés à l'état d'argile.

Les sulfates des métaux oxydables, en réagissant sur les phosphates et carbonates calcaires des corps organi-

sés et des coquilles, auront donné naissance à du sulfate de chaux et à des phosphates, ainsi qu'à des carbonates de plomb, de cuivre et de zinc, qui auront été décomposés par de nouvelles réactions; il se sera déposé alors des hydrates de fer argentifères. D'un autre côté, les eaux salées, en traversant les roches, réagissaient sur plusieurs des parties constituantes du filon, et concouraient à la formation du phosphate et du sulfate de plomb, comme on le verra plus loin. La solution de sel marin, en réagissant sur l'argent, a donné naissance au chlorure. Les pacos qui renferment de l'argent métallique, présentent ce métal tantôt sous forme de dendrites, tantôt sous celle de dépôts très-minces, semblant indiquer une réduction du chlorure, qui aura pu s'effectuer quand ce composé aura été en contact avec des corps plus avides de chlore que l'argent.

Les vallées d'érosion étant devenues plus profondes, les eaux n'arrivèrent plus dans le filon qu'en moindre proportion, tandis que l'air y entrait par toutes les issues qu'elles y avaient formées : il faut faire remonter à cette époque la formation du carbonate de plomb noir.

Les sulfates de zinc et de fer, qui ne cessaient pas de se former en dissolution, continuaient à réagir sur le feldspath de la roche porphyrique encaissante en enlevant le silicate de potasse. Il résultait évidemment de cette réaction, indépendamment de la silice gélatineuse, des sulfates d'alumine et de potasse. Quand le sulfate d'alumine rencontrait du carbonate de chaux, il y avait décomposition et dépôt d'alumine hydratée.

Une autre portion de la silice gélatineuse, en se combinant dans les anfractuosités du filon avec l'alumine hydratée, formait ces masses assez considérables d'hydrosilicate d'alumine, dont les éléments ne sont pas en proportions définies. Une autre portion de l'alumine, en se combinant avec le plomb, aura produit le plomb gomme. On ne doit pas être étonné de l'action puissante qu'a dû exercer le sulfate de fer sur la plupart des minéraux préexistants, lorsqu'on connaît la puis-

sance dissolvante de ce sel, surtout quand le fer est au maximum d'oxydation. Les sels ferreux, en réagissant sur le phosphate de plomb, auront donné naissance à des tubes prismatiques de sous-phosphate de fer, et à ces encroûtements de même composition qui recouvrent les cristaux de chloro-phosphate de plomb.

Les schistes pyriteux et la brèche pyriteuse fournissent abondamment des aluns de plume et du sulfate de fer; la blende et les pyrites du filon, les sulfates de zinc et de fer. La réaction de ces sels sur la chaux carbonatée donne naissance à des cristaux de gypse, d'où résultent de l'hydrate d'alumine siliceuse et du plomb carbonaté en houppes ou cristaux qui se trouvent en suspension dans les hydrates. Il se produit en même temps du phosphate de fer résinite, mélangé d'hydrate, qui se dépose journellement, ainsi que des petites masses molles de phosphate de plomb.

L'amas des minerais de cuivre de Chessy, près de Lyon, nous montre également de nombreuses réactions qu'il importe de connaître. Ces minerais se composent de cuivre pyriteux, de cuivre noir, de cuivre carbonaté bleu et vert, et de protoxyde de cuivre. Le cuivre pyriteux ou double sulfure de cuivre et de fer se trouve dans le terrain primitif, composé d'une diabase (amphibole et feldspath); le cuivre noir, dans le terrain de transition, mélange de schiste feldspathique et de diabase; le cuivre oxydulé, entre le cuivre noir et le cuivre carbonaté, dans une couche d'argile rougeâtre, séparant le terrain de transition du grès bigarré; le cuivre carbonaté, dans le grès bigarré, dans les parties les plus rapprochées du sol où les influences atmosphériques exercent plus facilement leur action. Dans le grès bigarré, on a rencontré un grand nombre de boules plus ou moins sphériques, d'une grande dureté, présentant à leur centre des vides tapissés de cristaux de carbonate bleu de cuivre, et renfermant de l'eau, indice d'une origine aqueuse.

La pyrite cuivreuse, en se décomposant, donne nais-

sance à la mine noire, qui est un mélange de sulfure et d'oxyde, et à des sulfates de cuivre et de fer entraînés par les eaux, ou qui cristallisent quelquefois. Ces sulfates, en réagissant sur les roches environnantes, donnent naissance aux produits suivants :

1° De l'hydrate de peroxyde de fer, provenant de la suroxydation des sulfates ferrugineux; des petits cristaux de sulfate de chaux;

2° De l'oxyde de fer imprégnant le grès métallifère;

3° Du cuivre oxydulé, qui peut être formé par la décomposition du sulfate de cuivre dans son contact avec les roches contenant du protoxyde de fer : dans ce cas, le fer se peroxyde et le cuivre passe à l'état de protoxyde ou se réduit entièrement.

Les pyrites cuivreuses, en se décomposant, produisent du carbonate de cuivre. Le cuivre carbonaté bleu est formé par la réaction du sulfate de cuivre sur le carbonate de chaux qui cimente les grès. On trouve souvent, l'un à côté de l'autre, le cuivre carbonaté bleu et le cuivre carbonaté vert, avec de l'hydro-silicate d'alumine qui imprègne ces grès. L'hydro-silicate d'alumine est dû à l'action des sulfates sur les roches siliceuses et alumineuses. La silice qui est à l'état gélatineux provient de la même réaction; M. Fournet a reconnu qu'elle se forme dans un intervalle d'une trentaine d'années. La silice endurcie est accompagnée d'hydro-silicate d'alumine. L'hydro-silicate de cuivre se forme dans la réaction du sulfate de cuivre sur les roches qu'il traverse.

Les observations faites par M. Fournet dans les filons de Pontgibaud, nous ont procuré des documents précieux sur les décompositions qui s'opèrent dans ces filons; mais pour bien s'en rendre compte, il faut entrer dans quelques développements sur leur mode de remplissage.

Les roches primitives de cette localité présentent une multitude de fissures ou filons, renfermant de la galène argentifère, du cuivre pyriteux, de l'antimoine sulfuré, etc. Le terrain qui encaisse les filons varie dans sa composition : sur les plateaux, il est formé principale-

40.

ment de schiste micacé, tandis que dans les vallées profondes il renferme des roches magnésiennes; tout le système, en outre, est traversé par des amas de granit.

Le schiste micacé et le stéaschiste sont les roches métallifères par excellence. Toutes les variétés éprouvent une altération qui les fait passer à des teintes vertes ou jaunes, plus ou moins prononcées; la décomposition des pyrites qu'elles renferment donne naissance à des efflorescences magnésiennes ou vitrioliques.

La protogine fournit de gros amas saillants dans les vallées, par suite de la décomposition des roches schisteuses environnantes; elle éprouve elle-même des altérations par le passage du feldspath à l'état de kaolin.

Ces filons paraissent avoir été remplis de deux manières: par des fragments anguleux des roches voisines venus de la surface du globe, et par des sources qui ont surgi de l'intérieur.

Le remplissage provenant de l'extérieur se compose de fragments de roches anciennes qui ont éprouvé quelque altération, tels que des schistes dont le talc et le mica sont changés en une substance grise, tachante et ardoisée, des schistes talqueux dans lesquels la stéatite s'est isolée en veinules ou nodules jaunes très-onctueuses, et des granits dont le feldspath est converti en kaolin. Les granits de même formation, qui se trouvent en amas, et loin par conséquent du contact d'autres corps, n'ont éprouvé aucune altération.

Le remplissage par l'intérieur paraît être dû à des sources qui ont déposé de la silice, du sulfure de fer et des pyrites arsenicales sur les fragments des roches primitives. Ces dépôts, qui ont été enveloppés ensuite par tous les autres dépôts, constituent la première époque de remplissage. Cette époque est caractérisée par une absence presque complète de cristallisation. Il semblerait que les eaux minérales étaient tellement chargées de substances ou d'éléments propres à produire ces dernières, qu'elles ont dû se prendre en masse.

M. Fournet a observé quatre autres époques de rem-

plissage. A la seconde, les fentes primitives ont éprouvé une nouvelle dilatation, il en est résulté plusieurs branches secondaires auxquelles on donne ordinairement le nom de filon du mur ou du toit, et dont les caractères sont essentiellement différents de ceux du filon primitif. Ces branches secondaires ont été remplies par des produits secondaires et tertiaires, comme les fentes précédentes, soit par des fragments anciens provenant de la surface et des débris quartzeux du filon, détachés par la violence de la secousse, soit par des dépôts de quartz et de sulfure des sources venues de l'intérieur. Les quartz se distinguent des précédents par une texture éminemment esquilleuse, et par une tendance prononcée à la cristallisation, qui a produit, vers les dernières périodes de l'époque, des pointements cristallins. Les dépôts du sulfure ont eu lieu autour de nodules anciens, et ont formé des zones alternatives de pyrites, de galène et de quartz régulier en petits cristaux.

A la troisième époque, une dilatation nouvelle du filon a eu lieu ; il en est résulté les mêmes accidents qu'à la deuxième, c'est-à-dire, des fractures, des éboulements de roches anciennes, et formation de nouveaux minéraux. Cette dilatation paraît avoir eu pour résultat de détourner les sources qui produisaient la blende et la galène, et d'introduire dans le filon des dissolutions chargées de sulfate de baryte, ou du moins de sels capables de le produire par leur réaction. Il n'est pas rare de trouver dans le filon de Barbeco, dont le centre est un fragment de roches anciennes, enveloppé de quartz esquilleux, des sulfures de plomb et de zinc de la précédente époque. Le sulfate de baryte, dans son contact avec les roches anciennes, a pris ordinairement des teintes violacées qui se perdent peu à peu, en raison de son éloignement des roches anciennes. Ce fait confirme l'observation qui est relative à la coloration du quartz esquilleux, savoir, que les eaux ont agi par voie de dissolution sur les roches préexistantes.

A la quatrième époque, l'énergie incrustante des sour-

ces paraît s'être affaiblie peu à peu; aussi les formes du minerai sont-elles devenues de plus en plus régulières. Le filon a achevé de se constituer, les salbandes se sont formées. M. Fournet divise les produits formés en deux classes: ceux provenant des sources de l'intérieur, et ceux qui sont dus à des causes extérieures. Ces derniers sont également des argiles tenaces et onctueuses, fréquemment chargées de détritus du filon lui-même.

Quelquefois les salbandes paraissent être le résultat d'une altération profonde de roches anciennes. Cet effet peut s'expliquer par le séjour prolongé des eaux dans le filon, en raison de l'analogie que l'on remarque avec l'altération identique des mêmes roches à la surface de la terre.

Pendant que ces altérations avaient lieu, il s'est formé des pyrites, d'autres substances, et divers carbonates qui indiquent la première arrivée de l'acide carbonique.

Enfin, la cinquième époque correspond probablement à celle des grandes alluvions et des éruptions basaltiques. Les dépôts siliceux ont toujours continué à paraître et n'ont pas cessé jusqu'à nos jours; mais avec cette différence, qu'il est impossible d'expliquer comment il se fait que la silice soit constamment dans un état gélatineux qui ne lui permet plus de cristalliser. Le fer et le manganèse y sont à l'état d'hydrate; la calamine seule, en raison de ses affinités énergiques, a pu conserver l'acide carbonique, qui, du reste, se dégage depuis cette époque, avec force, soit des eaux, soit des fissures multipliées produites par les commotions qui ont accompagné la série des éruptions volcaniques. Les dépôts ferrugineux et calcaires tendent constamment à obstruer les travaux du mineur.

Les dépôts de manganèse libre sont peu abondants, ceux de silice pure sont affectés à certaines localités, et les calcaires ne diffèrent pas en général de ceux qui constituent les stalactites ou les concrétions amorphes. Ces dernières sont quelquefois cristallisées assez irrégulièrement et en pointements oblongs, et plus fréquem-

ment toutes ces substances sont mélangées confusément ensemble, et constituent dans les galeries, ou à la surface du sol, des amas d'ocre effervescent, à base de silice gelatineuse.

Le fer hydraté, compacte et terreux provient évidemment de la décomposition des pyrites, puisqu'on trouve souvent dans son centre des portions de pyrites encore brillantes; le fer hydraté pulvérulent, de celle du carbonate de fer; le fer arséniaté vert pâle, des pyrites arsenicales; le fer phosphaté en filaments très-ténus est aussi une formation moderne.

La galène se décompose également comme le sulfure de fer, mais beaucoup moins rapidement, et se convertit à la longue en une substance pulvérulente noire et tachante. Elle donne quelquefois naissance à du plomb carbonaté noir ou blanc, vitreux ou terreux, qui reste mélangé avec la galène. On trouve fréquemment de ces formations dans les galeries de mines. Quelquefois l'acide sulfurique reste combiné avec l'oxyde de plomb, et donne naissance à du sulfate en petits octaèdres.

La blende est aussi soumise à des altérations particulières, d'où résultent du sulfure et de l'oxysulfure de zinc.

Le cuivre pyriteux, en se décomposant, donne naissance à du sulfate et à des carbonates de cuivre vert pulvérulent ou cristallisé, ou bien à du protoxyde de cuivre en petites houppes soyeuses.

Pour compléter le tableau des réactions lentes qui s'opèrent journellement dans la croûte superficielle du globe, nous rapporterons des observations pleines d'intérêt, consignées dans une lettre de M. Pilla à M. Élie de Beaumont, que ce dernier a eu l'obligeance de me communiquer. Ces observations ont été faites dans une ancienne exploitation étrusque de cuivre pyriteux, près de la Rocca S. Silvestro, abandonnée depuis un grand nombre de siècles, et se trouvant par conséquent dans les circonstances les plus favorables pour fournir des documents précieux sur le sujet qui nous occupe.

« Tout récemment, en poursuivant les traces des ex-
« ploitations anciennes, on a découvert un profond sou-
« terrain qui restait caché par des remblais, dans le
« fond de la galerie dite de la Grande-Cave..... J'ai trouvé
« l'intérieur de ce souterrain dans un état vierge, après
« avoir été pendant bien des siècles le théâtre d'opéra-
« tions souterraines lentes; pour y pénétrer, il fallait
« descendre en suivant une crevasse très-étroite, très-
« surbaissée, dont les parois étaient tapissées de jolies
« gerbes de substances cristallisées et stalactitiques.
« Après avoir franchi cette gorge, on passait dans une
« vaste caverne d'une beauté ravissante..... Toute la sur-
« face était recouverte de tapis et de stalactites d'une
« couleur bleue, que l'œil ne se lassait pas de regar-
« der..... Les principales substances étaient composées
« de sulfate de cuivre, de cuivre hydro-siliceux et de
« gypse. Les deux premières substances se trouvaient en
« grande partie accumulées dans le fond de la grotte,
« en forme de dépôts stalagmitiques..... Elles reposaient
« en général sur une couche brunâtre et résinoïde, com-
« posée en grande partie de pittizite; dans quelques
« parties, on les voyait déposées sur du bois noirci et
« passé tout à fait à l'état de lignite. J'observai aussi,
« entre le bois et la couche bleue cuivreuse, une subs-
« tance noire résinoïde semblable à du goudron épaissi.
« L'épaisseur du dépôt était variable; dans un coin de
« la grotte on voyait des couches de plusieurs pieds de
« puissance. Nous en détachâmes des morceaux, qui,
« transportés hors de la mine, à la lumière du jour, se
« montraient d'une beauté incomparable.

« Le gypse formait sur les parois de la grotte des
« croûtes de deux à trois pouces d'épaisseur; leur sur-
« face présentait des touffes de cristaux, très-jolis et très-
« réguliers, qui avaient jusqu'à un pouce et demi de
« longueur, et appartenaient en grande partie à la va-
« riété dite *trapézienne*...... La plus grande partie du
« gypse était colorée en bleu ou en verdâtre, et produi-
« sait une belle variété particulière, qu'on pourrait ap-

« peler *gypse cuprifère*. Dans tout le souterrain, il n'y « avait qu'un faible suintement aqueux..... Quant à l'ori« gine du sulfate de cuivre et même du cuivre hydro« siliceux, elle est très-facile à comprendre, d'autant « plus que je n'ai pas trouvé ces substances cristallisées. « On ne peut pas dire la même chose pour le gypse, « et surtout pour les beaux cristaux qu'il forme..... J'ai « observé la production récente de cette substance dans « les volcans actifs et dans les solfatares de Naples, « mais toujours en masses fibreuses, jamais en cristaux « réguliers et bien terminés; je l'ai observée aussi dans « *les lagoni* de Toscane. Dans tous ces endroits, elle « dérive de la décomposition de l'acide sulfhydrique, qui, « en réagissant sur la chaux des laves pyroxéniques, ou « des roches calcaires, détermine la production du gypse, « lequel reste dans la position où il a été formé. Mais dans « le souterrain de Campiglia l'origine du gypse est bien « différente; il provient de la décomposition de la py« rite cuivreuse, et de la réaction de l'acide sulfurique « sur la chaux du pyroxène. Le gypse ainsi produit « n'est pas resté en place; il a été transporté à la sur« face des parois du souterrain, où il a cristallisé. Sa « production a donc été par voie humide..... En consi« dérant le faible suintement de liquide qui tient en so« lution les substances déposées dans la grotte, et par « conséquent la petite épaisseur de la couche qui pou« vait se produire dans le cours d'une année; d'un autre « côté, prenant pour mesure l'épaisseur du dépôt en« tier, qui, dans quelques points, n'était pas moins de « trois pieds, je ne crains pas d'affirmer que sa produc« tion a dû exiger près de 3000 ans pour atteindre la « puissance qu'il a.

« En visitant le souterrain de Campiglia, je me suis « rappelé des observations récentes de M. Becquerel sur « les courants électriques souterrains. Il serait difficile « de trouver un autre endroit plus opportun que celui« ci pour faire des observations de cette nature. On y « trouve réunies toutes les circonstances nécessaires

« pour vérifier la manifestation de ces courants ; il y a « un riche dépôt de substances produites par des actions « électro-chimiques, qui annonce une grande source « d'électricité ; il y a des liquides en circulation et des « amas métalliques capables d'exciter des courants élec« triques, etc. »

§ IV. — *Des dépôts modernes de calcaire.*

Il se forme de nos jours des dépôts très-étendus appelés *tufs calcaires*, formés à la surface du sol par des eaux chargées de carbonate de chaux, enlevé aux formations calcaires et tenu en solution par l'intermédiaire de l'acide carbonique. Ces dépôts affectent diverses formes : tantôt ils sont compactes et homogènes, tantôt plus ou moins cariés ; d'autres fois, ils sont fibreux, ils forment des stalactites et des stalagmites. Ils renferment fréquemment des coquilles fluviatiles ou terrestres qui indiquent leur origine récente.

On rencontre encore de ces dépôts dans les mers, sur les rivages où ils cimentent des matières arénacées, comme en Sicile, dans les environs de Messine, à la Guadeloupe et dans l'île de Ceylan. A la Guadeloupe, on y trouve en outre des ossements humains.

Les dépôts calcaires qui se forment sous les eaux douces, comme on en a un exemple dans les marais de Czegled en Hongrie, acquièrent assez de dureté pour servir de pierres à bâtir. A Carlsbad, en Bohême, il se dépose journellement des concrétions calcaires que l'on a rapportées à l'arragonite. A Saint-Nectaire, dans le département du Puy-de-Dôme, dans des tufs modernes, on trouve de semblables dépôts, qui ne présentent en général qu'une cristallisation confuse de cristaux groupés irrégulièrement les uns à côté des autres, et partant d'un centre commun. A Clermont, en Auvergne, il existe des fontaines incrustantes qui déposent sur les corps une croûte de très-petits cristaux de carbonate de chaux.

Les eaux de Saint-Nectaire, qui renferment un grand excès de gaz acide carbonique, comme l'indique l'ana-

lyse suivante due à M. Berthier, éprouvent des décompositions à l'air, que nous devons faire connaître, parce qu'elles indiquent les causes qui concourent à la formation des dépôts.

	Sels sans eau.
Acide carbonique libre.........	0,000736
Carbonate de soude neutre.....	0,002833
Chlorure de sodium...........	0,002420
Sulfate de soude.............	0,000156
Carbonate de chaux...........	0,000440
Carbonate de magnésie.........	0,000240
Silice.......................	0,000100
Oxyde de fer................	0,000014
	0,006203

Ces eaux suintent en bouillonnant à travers les fissures d'un gneiss jaunâtre en décomposition. Près de leur source elles sont très-limpides, mais elles ne tardent pas à loucher, et déposent sur le sol des incrustations calcaires qui s'accumulent avec le temps et finissent par former des roches d'une grande étendue. Dans les journées chaudes, elles déposent sur les herbes des efflorescences blanches alcalines. Ces dépôts varient de couleur : ils sont d'une teinte ocracée due à l'oxyde de fer, qui se dépose dès que l'eau a le contact de l'air. Les autres sont grisâtres ou blanchâtres, et sont composés de couches concentriques; la cassure en est presque toujours cristalline et striée. Voici l'analyse que M. Berthier a donnée de toutes ces concrétions :

	Dans les concrétions ocracées.		Dans les concrétions blanches.
Sable mêlé de silice gélatineuse..	0,14	...	0,18
Carbonate de chaux..........	0,78	...	0,78
Carbonate de magnésie........	0,04	...	0,04
Oxyde de fer................	0,04	...	trace
	1,00		1,00

Les efflorescences alcalines sont pulvérulentes et d'un

blanc de neige; leur saveur est fortement alcaline : elles sont composées de

Sous-carbonate de soude..........	0,657
Muriate de soude................	0,080
Eau de cristallisation.............	0,263
	1,000

M. Berthier envisage comme il suit la décomposition des eaux minérales de Saint-Nectaire :

Ces eaux, au contact de l'air, dégagent de l'acide carbonique ; le fer, qui paraît se trouver dans l'eau à l'état de carbonate de protoxyde, passe à un degré supérieur d'oxydation, et se dépose presque immédiatement à l'état d'hydrate de peroxyde. La silice vient ensuite, puis le carbonate de chaux, le carbonate de magnésie..... Le dégagement d'acide carbonique continuant toujours, le carbonate neutre de soude devient de plus en plus alcalin, se transforme entièrement en sous-carbonate; après cela, l'eau minérale n'éprouve plus aucune altération.

§ V. — *De la formation spontanée de l'ammoniaque.*

L'ammoniaque se forme fréquemment dans les décompositions électro-chimiques ainsi que dans certaines actions spontanées. (Becquerel, *Traité de l'Électricité et du Magnétisme*, t. V, 1re partie, p. 83.)

Vauquelin a observé que la rouille qui se forme sur le fer, dans les maisons habitées, contient ordinairement des vapeurs ammoniacales. Ces vapeurs ne sont pas absorbées par la rouille, mais elles se forment quand l'eau réagit sur le fer au contact de l'air. Elles existent également dans différents minerais de fer, tels que le fer oligiste lamelliforme de l'île d'Elbe, la variété compacte de Framont, le fer oxydulé, le fer hématite, l'hyénite, le fer oxydé terreux; enfin dans le résidu des eaux de Passy, après l'évaporation. M. Boussingault a constaté également ce fait sur des minerais de fer nouvellement

tirés de terre, afin de montrer que la formation de l'ammoniaque ne devait pas être attribuée au séjour prolongé de ces minerais dans les maisons habitées.

La présence de l'ammoniaque dans les oxydes de fer naturel et dans les composés de ce métal semble indiquer que ces oxydes et ces composés proviennent de l'oxydation du fer par l'eau dans les temps primitifs.

On est porté à croire que toutes les fois qu'une substance s'oxyde en décomposant l'eau au contact de l'air, il se produit toujours de l'ammoniaque. Cette production a lieu également dans les phénomènes électro-chimiques.

§ VI. — *Sur la formation spontanée du nitrate de potasse.*

Les expériences de Cavendish ont démontré qu'il se forme de l'acide nitrique dans l'air, pendant les orages, par suite des décharges électriques. M. Liebig, qui a analysé soixante-dix-sept résidus obtenus par l'évaporation d'eaux de pluie, a reconnu que, sur ce nombre, il y en avait dix-sept provenant de pluies orageuses qui contenaient tous de l'acide nitrique en quantité très-différente, combiné avec la chaux ou avec l'ammoniaque. Parmi les autres échantillons, il n'y en avait que deux qui continssent des traces d'acide nitrique.

Quand l'eau de pluie est absorbée par des roches poreuses sur lesquelles elle peut agir, il en résulte des nitrates qui produisent des efflorescences dans les endroits situés à l'abri de la pluie et des injures de l'air; mais telle n'est pas en général la cause des nitrières. Commençons par citer des exemples : le nitrate de chaux existe dans un grand nombre de puits en Suède; il est naturel de rapporter sa formation au voisinage des habitations; car Luiscius, qui a analysé douze eaux de puits à Gessen, a trouvé dans toutes des nitrates, tandis que des eaux tirées de puits situés à quelques centaines de pas de la ville n'en renfermaient aucune trace. Il faut en conclure que la présence des matières animales

a exercé une influence déterminante sur la production de ces nitrates.

John Davy, en visitant l'île de Ceylan, a trouvé vingt-deux cavernes desquelles on extrait du nitre. Les roches dans lesquelles elles sont creusées contiennent toujours, au moins, du carbonate de chaux et du feldspath. Suivant ce chimiste, la décomposition du feldspath et la réaction du carbonate sur l'oxygène et l'azote de l'air donnent naissance à du nitrate de chaux qui se change en nitrate de potasse, par suite de son action sur le silicate de potasse que perd le feldspath. Le salpêtre se forme à la surface de la roche, là où l'air a accès, et il est toujours accompagné de nitrate de chaux et de magnésie; de plus, on n'en trouve pas sur les roches qui ne renferment ni chaux ni feldspath. Il est d'autres circonstances qui favorisent aussi la formation du salpêtre, c'est l'existence d'un peu d'humidité et d'une petite quantité de matière animale. Néanmoins, John Davy n'adopte pas cette opinion, quoique dans les grottes de Ceylan on trouve généralement des excréments de chauves-souris. A l'appui de sa manière de voir, il cite la nitrière de Mémorra, où l'on trouve du nitre, quoiqu'il n'existe aucune trace de matière animale.

Au volcan de Chalusset, dans les environs de Pontgibaud, département du Puy-de-Dôme, il existe une coulée de lave excessivement poreuse, qui forme un escarpement abrupte et très-élevé au-dessus de la Sioule. On trouve dans cette masse du salpêtre disséminé en petites houppes cristallisées blanches.

A la Roche-Guyon, à peu de distance de Paris, il existe des nitrières qui sont l'objet d'une exploitation; elles se composent d'une craie très-poreuse dont les couches, coupées à pic, se trouvent exposées à l'action directe des rayons du soleil. La Seine coule au pied des collines où se trouvent les terrains crayeux. Les habitants grattent la surface des couches deux fois l'an. On enlève quelques millimètres d'épaisseur que l'on traite comme des platras salpêtrés. Le résidu crayeux qui reste

après les lavages est façonné en pains et abandonné aux influences atmosphériques, qui déterminent une nouvelle formation de nitre. M. Dumas, qui a visité les lieux avec soin, ne pense pas que la matière animale soit assez abondante pour que l'on puisse lui attribuer la formation presque indéfinie des nitrates qui y prennent naissance. Suivant lui, la grande quantité d'eau qui s'évapore du sol voisin et même de la Seine, et qui renferme en dissolution des matières organiques, est absorbée par la craie et y dépose des résidus organiques qui aident à la formation du nitre. La craie serait donc une sorte d'éponge se desséchant à la surface et reprenant par la capillarité l'humidité aux couches voisines, et qui, de proche en proche, ferait arriver de loin les matières animales déposées dans le sol. Dans cette localité, on a observé un fait qui est une forte objection contre les partisans de la doctrine qui attribue le rôle essentiel aux matières animales : il existe dans ces nitrières des cavités creusées par les exploitants, qui servent de caves, d'écuries et même de pigeonniers, et dans lesquelles il ne se produit pas de nitre. Il faut ajouter néanmoins que les parois de ces cavités sont formées d'un calcaire qui n'est pas poreux comme la craie. D'après ce qui précède, on voit que plusieurs causes peuvent concourir à la formation des nitrières naturelles, et qu'on en est encore réduit à des conjectures à cet égard.

§ VII. *Des produits qui se forment journellement dans les tourbières.*

La tourbe, qui est formée de débris de substances herbacées ou d'autres végétaux en décomposition, donne naissance à divers composés qui se trouvent dans les divers terrains composant la croûte superficielle du globe.

On distingue deux espèces de tourbe, la tourbe des marais et la tourbe marine. La tourbe des marais, comme son nom l'indique, occupe les parties basses ayant servi de fond d'étang ou de lac d'eau douce et recouvertes

d'un mètre au plus de terre végétale : elle renferme ordinairement des substances minérales, des débris de corps organisés qui, en réagissant sur les substances environnantes, produisent des pyrites et du phosphate de fer pulvérulent qui enveloppe quelquefois les racines ou les tiges des végétaux dont se composent ces combustibles. On y rencontre aussi des couches de sable et de marne déposées par les alluvions, des coquilles fluviatiles dont les animaux ont été décomposés, des armes, des outils, etc.

Les tourbes marines sont celles dans lesquelles on trouve des végétaux et des corps organisés marins. Il existe aussi des tourbes sous-marines, formées quelquefois d'une grande accumulation de végétaux ligneux, d'arbres et de plantes qui croissent dans les forêts. Elles renferment aussi des débris d'animaux terrestres.

La tourbe pyriteuse du département de l'Aisne est remarquable sous le rapport des composés qui s'y forment souvent en peu de temps. Cette tourbe, qui est plus ou moins compacte, est pénétrée de sulfure de fer qui s'enflamme spontanément à l'air et produit une grande quantité de proto-sulfate de fer. On trouve confondus ensemble des bois fossiles, des troncs entiers d'arbres quelquefois pyriteux à l'endroit des nœuds, des bois pétrifiés, beaucoup de pyrites, du succin de diverses couleurs, des os fossiles, des cristaux de quartz, des roches calcaires, des ocres, du cuivre, du zinc, probablement à l'état de sulfure, du sulfate de soude, de l'alun, des cristaux de gypse qui acquièrent un volume assez considérable dès l'instant que les marnes qui les renferment sont exposées au contact de l'air.

Voici comment on peut concevoir toutes ces réactions :

Les plantes réunies en tas à l'air libre éprouvent, par l'effet de l'eau, de l'air et de la chaleur, une décomposition telle, qu'il se dégage de l'hydrogène et du gaz acide carbonique ; il se forme en même temps des huiles, des résines, etc. ; il se sépare des végétaux, du carbone, de la silice et des sels. Quand les plantes sont recouvertes

d'eau, et communiquent difficilement avec l'air, les effets sont beaucoup plus lents : la plupart des éléments gazeux restent dans les dépôts vaseux des marais ; les sels solubles sont enlevés, tandis que le carbone reste en abondance et constitue la masse de la tourbe.

La tourbe pyriteuse est pénétrée de toutes parts de sulfure de fer qui est cristallisé, surtout dans les coquilles, dans les fentes ou les cavités des bois fossiles. Cette tourbe pyriteuse ne renferme point de bitume, ce qui tendrait à faire croire que la pyrite provient de la réaction du bitume sur le sulfate de chaux.

Quand les tourbes pyriteuses sont exposées à l'air humide, les deux éléments de la pyrite s'oxydent. Il se sublime du soufre qui cristallise en filaments capillaires à sa surface, et il y a dégagement d'hydrogène sulfuré. L'acide sulfurique, en réagissant sur l'argile, produit de l'alun, et sur le calcaire du sulfate de chaux.

Sage a observé, dans du terreau de trois ans qui n'avait pas encore servi à la végétation, une grande quantité de cristaux de quartz dont il a pu suivre le développement ; les particules de silice qu'abandonnent lentement les végétaux en décomposition peuvent donc se grouper régulièrement, par cela même qu'étant à l'état naissant, elles se trouvent dans la position la plus favorable pour cristalliser. Quant au phosphate de fer, on le rencontre très-fréquemment à l'état pulvérulent ou formant des cristaux d'un beau bleu. La formation de ce composé exige le concours du fer et d'une matière animale qui existe ordinairement dans les tourbières. Nous ferons remarquer, à cet égard, que Sage a décrit un phosphate de fer trouvé à Luxeuil, dans un ancien canal de construction romaine, au milieu d'une espèce de tourbe ligneuse, d'ossements altérés presque friables et pénétrés d'oxyde de fer.

La pyrite ou proto-sulfure de fer, renfermant la même quantité de soufre et de fer que le proto-sulfate, il en résulte que si ce dernier sel est en contact avec des corps très-avides d'oxygène, qui puissent désoxyder en

même temps l'acide sulfurique et le protoxyde de fer, il se formera naturellement un proto-sulfure.

M. Fournet a trouvé des cristaux de ce sulfure dans un morceau de fer détaché de l'arbre tournant d'une roue hydraulique, où il servait à fixer le tourillon. On était dans l'usage d'enduire l'axe de matières grasses provenant de la purification des huiles par l'acide sulfurique; ainsi la réaction de ces matières et de l'acide sulfurique sur le fer a déterminé la formation des pyrites : quelques années ont suffi pour cela. Il faut donc que la matière organique ait désoxydé l'acide sulfurique de manière à mettre en présence le soufre et le fer.

Les pyrites se forment encore dans les eaux thermales, comme M. Longchamp l'a reconnu en examinant un dépôt recueilli dans le conduit de la principale source des eaux thermales de Chaudesaigues. Ce dépôt était mamelonné et crevassé; sa surface, d'un rouge brun, avait l'aspect du peroxyde de fer; mais, en le brisant, on apercevait des plaques de fer sulfuré. Nous ajouterons, pour l'intelligence de ce fait, que les sources sortent des roches à travers les fissures d'un filon de quartz, lesquelles sont tapissées de sulfure de fer. La température de la source est de 88° centigrades.

Nous mentionnerons encore un fait qui n'est pas sans intérêt relativement à la formation des phosphates. On a trouvé à Laon, dans un tombeau, le squelette d'un évêque posé sur des barreaux de fer; les os avaient éprouvé un genre de décomposition tel, que leur surface était recouverte de cristaux qui ont donné à l'analyse, suivant M. Pelouze, 25 pour 100 d'une matière azotée, et 75 de phosphate de chaux basique, présentant la même composition que celle des os. Ils ne renfermaient pas la plus petite quantité de carbonate de chaux. La plupart de ces cristaux étaient colorés en violet par le phosphate de manganèse, dont la base existait probablement dans le fer.

§ VIII. — *Des décompositions produites par cémentation.*

Des substances, même cristallisées, se forment quel-

quefois par un changement graduel de composition, sans que les formes extérieures éprouvent la moindre modification. Nous allons en citer quelques exemples :

La chaux sulfatée anhydre prend à l'air une certaine quantité d'eau, sans pour cela changer de forme. On trouve à Chessy des cristaux de cuivre carbonaté bleu, recouverts de cuivre carbonaté vert fibreux; on suit très-bien les passages successifs indiquant que les cristaux, dans l'origine, étaient privés d'eau. Dans cette transformation, le cuivre carbonaté bleu perd une portion de son acide carbonique, qui est remplacé par une quantité d'eau correspondante.

Les cristaux octaèdres de cuivre oxydulé présentent les mêmes effets; on trouve ordinairement au milieu des cristaux du protoxyde de cuivre.

Le cuivre sulfuré prismatique et les pyrites cuivreuses, tout en conservant leur forme, éprouvent des changements graduels.

Le fer spathique se change peu à peu en hydrate de peroxyde, et se présente sous la forme d'une masse terreuse brunâtre. Le persulfure de fer naturel se change en hydrate sans que la forme soit altérée. Le plomb participe à des changements analogues : le plomb sulfuré hexaèdre, composé d'un atome de plomb et de deux atomes de soufre, est transformé en sulfate de plomb, dans lequel le plomb et le soufre sont dans les mêmes proportions.

On a trouvé aussi des échantillons de sulfure de plomb qui ne présentaient plus qu'un mélange de carbonate et de sulfate du même métal. On sait aussi que le plomb phosphaté se change en plomb sulfuré; le clivage est celui qui convient à la galène, il est cubique.

Les oxydes de manganèse participent également aux mêmes changements. Le double carbonate de chaux et de baryte, composé d'un atome de chacun de ces composés, passe quelquefois à l'état de sulfate de baryte. Le carbonate de baryte se décompose d'une manière analogue; l'antimoine natif, en absorbant l'oxygène de l'air,

se recouvre d'une couche blanchâtre d'oxyde d'antimoine plus ou moins profonde. De même, le sulfure d'antimoine qui appartient au système prismatique, et qui est composé d'un atome de métal et de trois atomes de soufre, se décompose, se change peu à peu en oxy-sulfure hydraté; la forme reste toujours la même. Les cristaux de carbonate de chaux sont souvent enlevés des substances qui les recèlent par suite des influences atmosphériques; la place laissée vide par ces cristaux est remplie par d'autres cristaux.

Dans le Sommerset-shire, on trouve la calamine sous la forme des cristaux métastatiques de chaux carbonatée. Cette substance paraît avoir remplacé peu à peu la chaux, et non s'être déposée dans un moule. On observe souvent que le quartz remplace les cristaux de chaux carbonatée, de chaux fluatée et de gypse. M. Haidinger, qui a beaucoup étudié ces sortes de produits secondaires, pense que la silice ne s'est pas déposée dans les cavités comme dans un moule, et que le remplacement a eu lieu par une décomposition successive. Nous pourrions multiplier ces exemples, mais ceux qui précèdent suffisent pour donner une idée des décompositions produites par cémentation.

§ IX. — *Formation du minerai de fer des marais.*

On doit à M. Daubrée, ingénieur des mines, des recherches sur la formation du minerai de fer des marais et des lacs, qui n'est pas d'une date très-ancienne, puisqu'on y rencontre des produits de l'industrie humaine. Ce minerai se rencontre ordinairement dans le voisinage des cours d'eau; quand il est enfoui dans le sol, il se trouve en général à une très-faible distance de la surface, qui ne va pas au-delà d'un mètre. Il est recouvert de tourbe, de gazon, de bruyères, de sable ou de limon. Il se trouve ordinairement en plaquettes, en veines ou en rognons. L'analyse qu'en a faite M. Daubrée indique comme principes constituants, suivant les localités, les oxydes ferrique, ferreux et man-

ganique; la chaux, la magnésie, l'alumine; les oxydes de zinc, de cuivre, de cobalt, de chrôme; les acides crénique et apocrénique; de l'eau, du sable, de l'argile et des débris organiques qui y sont mélangés mécaniquement. Les recherches de M. Daubrée l'ont conduit aux conséquences suivantes :

1° Le peroxyde de fer qui se trouve dans des terrains superficiels et peu cohérents, renfermant des matières végétales en décomposition, est dissous par les eaux météoriques infiltrées sous l'influence de certains produits de la pourriture des végétaux. La décoloration de l'argile et du sable ferrugineux, par les racines de plantes, s'observe sur de vastes étendues dans la vallée du Rhin et en Lorraine. Si le sol est perméable, les eaux qui contiennent le fer en dissolution reviennent à la surface du sol, et y forment des suintements ou de petites sources. Partout où ces eaux s'écoulent lentement au contact de l'air, elles abandonnent, particulièrement pendant l'été, une boue gélatineuse, riche en fer, qui est l'élément de la formation du minerai de marais.

Les roches amphiboliques et pyroxéniques amenées à l'état terreux, et d'autres roches ferrugineuses, lorsqu'elles se trouvent dans les mêmes circonstances que les sables ocreux des alluvions anciennes, se comportent d'une manière semblable.

2° L'acide carbonique et l'acide crénique paraissent être les dissolvants dans l'eau du peroxyde de fer, réduit au moins en partie à l'état de protoxyde par la présence de la matière végétale qui l'avoisine.

3° Le précipité que les suintements ou sources abandonnent au contact de l'air, consiste en une boue gélatineuse, d'un brun noirâtre, qui se compose principalement de protoxyde et de peroxyde de fer, combinés à de l'acide carbonique, de l'acide crénique et de l'eau. L'oxyde de manganèse y manque rarement, et sa présence est probablement due aux mêmes réactions que celle de l'oxyde de fer. L'acide carbonique se dégage à mesure que le protoxyde de fer passe à l'état de peroxyde,

et enfin, après que la substance a été desséchée, il n'y reste plus que des traces de cet acide.

4° Si le précipité a séjourné quelques jours dans le bassin ou dans la rigole de la source, il est en outre mélangé de beaucoup de carapaces siliceuses d'infusoires.

L'acide phosphorique est fourni au fer, pour lequel il a beaucoup d'affinité, par les corps organisés qui vivent et meurent dans les eaux.

M. Daubrée a remarqué que les marais où se développe le minerai de fer sont quelquefois à proximité des terrains ferrugineux dont ils dérivent; que le mode de précipitation de l'oxyde de fer que l'on vient d'indiquer ne paraît pas être exclusivement restreint à l'époque actuelle, attendu que dans beaucoup de régions de l'Europe les sables et graviers des alluvions anciennes sont cimentés çà et là par des veines ou des rognons d'oxyde de fer, dont le dépôt, quoique aujourd'hui arrêté, est à rapprocher du minerai des marais.

Ce procédé n'est pas le seul que la nature emploie pour former des dépôts ferrugineux; en effet, dans la région volcanique de l'Eifel, les sources gazeuses de la vallée de Brohl apportent le fer à l'état de bi-carbonate, d'après M. Bischof, et le déposent à la surface sous forme de peroxyde mélangé de carbonate ferreux. D'autres dépôts peuvent résulter de la décomposition spontanée de la pyrite de fer, en présence de l'air et de l'eau. Tels sont peut-être les amas ocreux des Pyrénées, renfermant de l'or, ainsi que le suppose M. François. Mais parmi les dépôts contemporains des minerais de fer, ceux formés sous l'influence de la pourriture végétale dominent beaucoup en Europe par la grande étendue qu'ils possèdent; ils sont d'ailleurs à citer comme un des chaînons variés qui lient indirectement aux êtres organisés la formation de grandes masses minérales.

§ X. — *De la minéralisation des débris organiques.*

Les coquilles et autres corps organisés que l'on trouve dans les terrains de sédiment, se présentent sous divers

états : tantôt ils n'ont éprouvé d'autre altération que la perte de leur matière animale; tantôt les corps ont disparu, et il ne reste qu'une empreinte de leur forme extérieure ou un moule de leur forme intérieure; tantôt enfin, on n'a que la contre-empreinte des corps, la matière dont ils se composaient ayant disparu entièrement. Voici comment on peut interpréter ces phénomènes :

Lorsqu'on brise de la vase récemment retirée d'un étang, et qui a déjà atteint un certain degré de dessiccation, on voit que chaque coquille laisse l'empreinte de sa forme extérieure, en même temps qu'elle renferme un noyau qui représente sa forme intérieure.

Supposons maintenant que, dans cette même vase, la teste de la coquille ait été dissoute par des eaux chargées de gaz acide carbonique et enlevée, et que l'espace compris entre le noyau et l'empreinte ait été rempli postérieurement par du calcaire, de la silice, de la pyrite, etc., on aura une représentation exacte des deux formes intérieure et extérieure; on dit alors que la coquille est pétrifiée.

Il existe encore un autre mode de pétrification, c'est celui en vertu duquel des coraux d'origine calcaire sont changés en silex, tout en conservant leur organisation interne, quelque compliquée et petite qu'elle soit, ou bien d'après lequel du bois se présente à nous pétrifié, avec ses pores ou ses fibres, qui n'ont rien perdu de leur finesse. Pour expliquer cette métamorphose, il faut admettre que les corps qui l'éprouvent se laissent pénétrer par les eaux tenant en dissolution une des substances pétrifiantes, et que lorsqu'ils sont exposés aux influences atmosphériques ils finissent par se décomposer entièrement; les produits formés s'échappent dans l'atmosphère ou sont entraînés par les eaux. Dans l'eau, la décomposition est plus lente; dans la terre, elle l'est encore davantage. Or, si à mesure qu'une molécule organique est mise en liberté, elle est remplacée par une molécule de la substance minérale dissoute, on conçoit que l'on

finira par obtenir une métamorphose complète du corps.

Le professeur Göppert, de Breslau, a reproduit ce phénomène avec des substances végétales, imbibées de dissolutions siliceuses, calcaires ou autres, dont il détruisait les matières organiques à l'aide de la chaleur. Il a fait tremper, pendant plusieurs jours, des branches verticales et très-minces de sapin d'Écosse dans une solution de proto-sulfate de fer ; après dessiccation, il les a exposées à une chaleur rouge jusqu'à ce que la matière organique fût entièrement consumée : il n'est plus resté qu'un oxyde de fer ayant pris exactement la forme du sapin, et à un tel point, qu'au microscope on distinguait facilement les vaisseaux pointillés particuliers à cette famille de plantes.

On trouve dans *les Geological transactions* (vol. I, page 329, first series), un fait observé par M. Pepys, qui rentre dans le précédent. Une cruche de terre remplie de sulfate de fer était restée pendant un an dans un laboratoire, sans qu'on y touchât. Au bout de ce temps, on aperçut à la surface du liquide une substance huileuse et une matière pulvérulente jaune qui était du soufre. Au fond, on découvrit les os d'une souris, au milieu d'un sédiment composé de petits grains de pyrites, d'oxyde de fer, etc. Ces produits étaient évidemment le résultat de la réaction de la matière animale sur le sulfate de fer. Dans les eaux minérales, il peut se produire également des pyrites, quand elles renferment du sulfate de fer et des matières organiques.

La silice peut être fournie aux bois et aux coraux par les eaux thermales ; celle qui se trouve dans le tripoli et le silex de la craie, par la décomposition des infusoires, des éponges et d'autres corps.

SECTION II.

De la reproduction des phénomènes de décomposition et de recomposition terrestres.

Tous ces phénomènes sont le résultat d'actions lentes auxquelles concourent les forces de la nature inorga-

nique ; dès-lors nous devons les invoquer toutes pour essayer de les reproduire.

En chimie, on ne s'occupe en général de la réaction de deux corps l'un sur l'autre que lorsqu'il en résulte des composés appréciables au bout d'un certain temps, et, l'on néglige entièrement les effets électriques résultant de cette réaction ; cependant cette électricité, dans certaines circonstances, agit comme force chimique de manière à donner une nouvelle activité ou à diminuer l'action des affinités. Il peut alors en résulter, au bout d'un certain laps de temps, une foule de composés dont il n'est pas toujours possible de prévoir *à priori* la nature. La chimie, en faisant abstraction des effets électro-chimiques auxquels donnent lieu les faibles affinités quand elles s'exercent dans des circonstances que nous indiquerons, se prive d'un moyen puissant d'action. Nous diviserons le sujet que nous allons traiter en deux parties : la première comprendra les phénomènes produits par le concours seul des affinités ; la seconde, par le concours des mêmes affinités et de l'électricité agissant comme force chimique.

Pour montrer au lecteur l'influence que peut exercer l'électricité dans les actions lentes terrestres, nous serons forcés d'indiquer les procédés électro-chimiques à l'aide desquels on parvient à former divers composés analogues à ceux de la nature ; de cette manière, il sera plus facile aux personnes qui veulent donner une origine électrique à certains phénomènes géologiques, de rattacher ces procédés à ceux qu'elle emploie pour les former.

§ I. — *Des doubles décompositions, ou des décompositions successives.*

Les eaux minérales, en parcourant les divers terrains, s'infiltrent à travers les roches, réagissent sur leurs éléments et nous apportent en dissolution les parties solubles, tandis que celles qui ne le sont pas restent adhérentes à leur surface. Pour montrer quelle peut être la nature de ces réactions, nous présenterons d'abord

quelques développements sur les transformations successives que l'on fait subir à divers composés par le moyen des doubles décompositions, pour arriver à former des composés semblables à ceux que l'on trouve dans la nature. Pour en donner une idée, prenons une dissolution saturée ou non saturée de nitrate ou de sulfate du cuivre, cette dernière se rencontrant fréquemment dans les mines de cuivre; plongeons dedans un morceau de craie ou de calcaire poreux : le sel métallique réagit peu à peu sur le calcaire, il lui cède une portion de son acide en chassant l'acide carbonique, et de là résulte du nitrate ou du sulfate de chaux qui se dissout ou cristallise, et du sous-nitrate ou sous-sulfate de cuivre insoluble qui se dépose en petits cristaux verts ou aciculaires sur le calcaire; l'action continue dans l'intérieur. Il faut donc que, par deux effets dirigés en sens contraire, le nitrate de cuivre pénètre dans les interstices, et que le nitrate de chaux ou le sulfate de chaux ainsi que l'acide carbonique en soient expulsés. Le chlorure de cuivre donne également le sous-chlorure cristallisé. Avec le proto-sulfate de fer on obtient un sous-sulfate concrétionné, rubigineux, qui a de l'analogie avec celui que l'on trouve dans la nature; il se dépose en même temps une grande quantité de cristaux et de sélénites.

En examinant tous ces produits, on serait tenté de les regarder comme des minéraux, tant ils en ont l'aspect. Ces premières réactions obtenues, si on laisse séjourner un morceau de calcaire dont la surface est ainsi recouverte de cristaux de sous-nitrate de cuivre, dans une solution de bi-carbonate de potasse étendue d'une ou de deux fois son volume d'eau, on ne tarde pas à s'apercevoir que ces cristaux prennent une teinte plus foncée, et qu'ils se changent peu à peu en un double carbonate de cuivre et de potasse qui cristallise en aiguilles. Dans la réaction lente du bi-carbonate sur le sous-nitrate, le premier cède une portion de son acide à l'oxyde de cuivre; il en résulte un carbonate de potasse qui se combine avec le carbonate de cuivre.

Quant à l'acide nitrique, qui devient libre, il réagit immédiatement sur le carbonate de chaux en contact avec le sous-nitrate; il le décompose, et forme un nitrate de chaux qui est expulsé en même temps que l'acide carbonique. Aussitôt que ce nitrate est en contact avec le bi-carbonate alcalin, il s'opère encore une nouvelle décomposition, d'où résulte un carbonate de chaux qui cristallise en très-petits rhomboïdes. La manière dont le carbonate de chaux est produit indique son origine; car il forme des traînées tuberculeuses dont le bout correspond toujours à un interstice du calcaire. La forme tuberculeuse est due au dégagement du gaz venu de l'intérieur avec la dissolution de nitrate de chaux, qui est décomposée immédiatement par le bi-carbonate.

On voit donc qu'avec du calcaire poreux et des dissolutions de nitrate de cuivre et de bi-carbonate de potasse on obtient successivement des cristaux de sous-nitrate de cuivre, de double carbonate de cuivre et de potasse, et des cristaux rhomboïdaux de carbonate de chaux. Poursuivons les transformations, pour arriver au carbonate hydraté de cuivre. Si, après avoir retiré de la dissolution du bi-carbonate et lavé le morceau en expérience, on le plonge dans une solution de sulfate de cuivre, de nouvelles réactions se manifestent insensiblement. D'une part, il y a formation d'un double sulfate de potasse et de cuivre qui est dissous, et de sous-sulfate de cuivre, qui cristallise en aiguilles; de l'autre, le carbonate vert, qui provient du double carbonate, se dépose en cristaux verts aciculaires; mais on conçoit qu'il est nécessaire d'arrêter l'expérience à temps, pour ne pas décomposer ensuite le carbonate de cuivre. Il nous est arrivé quelquefois de trouver sur un des échantillons de petits cristaux bleus de carbonate de cuivre. Voilà donc des composés insolubles qui cristallisent en se formant, par cela même que les forces qui les produisent agissent lentement et sans interruption.

Le sous-sulfate soumis au même mode d'expérimentation produit des effets semblables. L'art consiste donc,

dans les transformations successives, à choisir des dissolutions qui réagissent très-lentement sur des doubles combinaisons insolubles, pour en retirer un des deux éléments et laisser l'autre dont les parties se groupent régulièrement. En opérant avec une solution de sous-carbonate au lieu de bi-carbonate, on obtient encore le double carbonate de cuivre et de potasse, qui cristallise en jolis petits cristaux prismatiques hexaèdres.

En faisant réagir des sous-sels sur des solutions de phosphate, d'arséniate, de chromate, d'oxalate, de tungstate, etc., on obtient des résultats analogues. Si l'on met par exemple le sous-nitrate de cuivre dans une solution saturée de phosphate d'ammoniaque, on ne tarde pas à s'apercevoir que le sous-sel se décompose peu à peu et qu'il se dépose sur la surface, çà et là, une multitude de cristaux limpides incolores formant des houppes radiées, tandis que la couleur verte du sous-sel prend une teinte bleuâtre. En examinant la nature de ces produits, on trouve que les cristaux limpides sont formés de phosphate de chaux pure, et la partie verte d'un double phosphate de cuivre et d'ammoniaque.

Avec l'arséniate d'ammoniaque, le mode d'action est le même, si ce n'est qu'il y a formation d'un double arséniate de chaux et de cuivre qui cristallise en jolis cristaux limpides de plusieurs millimètres de longueur, qui sont des prismes obliques à bases trièdres, lesquels deviennent opaques peu à peu en perdant leur eau de cristallisation, et leur surface se recouvre de filaments soyeux qui annoncent une nouvelle formation. On obtient aussi directement un double arséniate en faisant réagir une dissolution d'arséniate d'ammoniaque sur du carbonate de chaux, mais sa formation est beaucoup plus lente. Les doubles combinaisons, telles que double phosphate, double arséniate, peuvent être décomposées de manière à produire un phosphate de cuivre et un arséniate de la même base.

§ II. — *Action exercée par l'eau salée sur les diverses substances minérales.*

L'eau est le liquide le plus universellement répandu à la surface ou dans l'intérieur de la terre; aussi est-ce l'agent principal de décomposition, surtout quand il est en présence de l'air qui lui fournit le principe oxydant. L'eau qui renferme du chlorure de sodium est un agent encore plus actif, en raison de son pouvoir dissolvant: ce pouvoir est d'autant plus grand qu'elle renferme plus de sel : nous prendrons pour exemple les sulfates et les phosphates de plomb. Le premier composé est soluble dans une solution saturée de chlorure de sodium, dans la proportion de $0^{gr},66$ de sulfate de plomb par litre de solution à la température ordinaire. La solution, abandonnée à elle-même, laisse déposer sur les parois du bocal, dans l'espace de quelques jours, des cristaux de chloro-sulfate hydraté de plomb. On obtient de cette manière du chloro-phosphate de plomb. Ces composés existent dans la nature cristallisés, mais à l'état anhydre: on conçoit qu'une décomposition lente puisse leur enlever leur eau de cristallisation, sans que les substances soient dissoutes de nouveau.

L'eau salée exerce une action remarquable sur le sulfure de plomb ou galène, sous l'influence du sulfate de cuivre, qui peut même agir sans la présence du chlorure de sodium. Pour bien se rendre compte des effets produits, il faut se rappeler que le sulfure et le sulfate de plomb renferment les mêmes proportions atomiques de soufre et de plomb.

Pour opérer cette transformation, on met dans un bocal deux quantités à peu près égales de sulfate de cuivre et de sulfure de plomb, avec quatre ou cinq fois leur poids d'eau. Il s'opère une action telle dans l'espace d'un certain nombre de jours, que les deux sels sont décomposés complétement, c'est-à-dire que l'on a, d'une part, du sulfate de plomb, et de l'autre du sulfure de cuivre.

On peut voir tous les détails de cette expérience, dans

les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XX, p. 1509. Cette opération peut se faire hors du contact de l'air, et la chaleur l'accélère considérablement. La sulfatation du plomb a lieu par suite d'un échange de soufre, d'acide sulfurique et d'oxygène entre les bases. En même temps qu'il se forme du sulfate de plomb, on obtient du sulfure de cuivre.

On accélère considérablement la double décomposition, en ajoutant du sel marin à l'eau. Dans ce cas, le sulfate de cuivre, en présence du chlorure de sodium, se change en bi-chlorure de cuivre avec formation du sulfate de soude. Le bi-chlorure réagit sur le sulfure de plomb, d'où résultent du chlorure de plomb, qui se change en sulfate aussitôt qu'il est en contact avec le sulfate de soude, et du sulfure de cuivre qui se précipite. D'après ce mode d'action, le chlorure de sodium est sans cesse décomposé et recomposé; il sert donc d'intermédiaire entre le sulfure de plomb et le sulfate de cuivre pour opérer la double décomposition.

Si, au lieu d'agir sur du sulfure de plomb pulvérisé, on soumet à l'expérience des cristaux de galène d'une certaine grosseur, on voit peu à peu leur surface s'iriser, signe certain d'un commencement de décomposition.

La plupart des eaux renfermant plus ou moins de chlorure de sodium, on conçoit très-bien que, dans les mines de galène où il existe des pyrites cuivreuses qui se décomposent sous l'influence de l'eau et de l'air, il puisse s'opérer les phénomènes que nous venons de décrire, et que les produits formés cristallisent si les actions sont suffisamment lentes.

De la réaction du bi-carbonate de chaux sur le gypse.

Lorsque l'on plonge un morceau de sulfate de chaux cristallisé dans une solution saturée ou étendue de bicarbonate alcalin, il y a dégagement de gaz acide carbonique; le sulfate blanchit peu à peu, se recouvre de petits cristaux de carbonate de chaux; il se dépose aussi des cristaux de sulfate de chaux sur les parois du vase, et

la solution renferme du sulfate alcalin. Rien n'est plus simple que d'expliquer ces phénomènes : le sulfate de chaux étant faiblement soluble, à mesure qu'il se dissout il est décomposé par le bi-carbonate. Mais, comme le sulfate de chaux est composé d'un atome de base et de deux atomes d'acide sulfurique, ainsi que le sulfate de potasse, que le bi-carbonate de potasse renferme un atome de potasse et quatre atomes d'acide carbonique, le carbonate de chaux un atome de chaux et deux d'acide, il faut nécessairement que les deux atomes de gaz deviennent libres, et se dégagent comme l'expérience l'indique.

Quand on fait réagir le sous-carbonate, les mêmes produits se forment; mais alors il ne se dégage plus de gaz acide carbonique, puisque la quantité qui possède un atome d'alcali est saturée complétement par la chaux que l'acide sulfurique abandonne. Il suit de là, que lorsqu'une eau minérale alcaline traverse les terrains gypseux, ceux-ci doivent être peu à peu décomposés et changés en carbonate de chaux plus ou moins cristallin, suivant la lenteur avec laquelle s'opère la réaction.

§ III. — *Des courants électriques terrestres.*

On est assez disposé à rapporter à l'électricité les phénomènes dont la cause est inconnue. La production des substances minérales par voie aqueuse, ainsi que les altérations des roches, ont été considérées par plusieurs personnes comme ayant quelquefois cette origine, sans qu'on ait cherché à vérifier par l'expérience si cette hypothèse était fondée ou non. Nous allons suivre une marche différente, c'est-à-dire, que nous montrerons dans quels cas l'électricité agit comme agent chimique, non-seulement dans nos laboratoires, mais encore dans la nature, pour former des substances analogues à celles que l'on trouve dans l'intérieur de la terre.

La plupart des composés solides qui constituent la croûte terrestre sont des corps oxydés, mauvais conducteurs de l'électricité, et qui, par conséquent, ne peuvent intervenir dans sa transmission. Mais il n'en est pas

de même des composés métalliques qui remplissent les filons et veinules, et dont la quantité est excessivement faible comparée à celle des roches. Ces composés ne forment que très-rarement des conducteurs d'une certaine étendue, attendu qu'ils sont interrompus par des gangues quartzeuses ou autres non-conductrices; néanmoins, partout où ils se trouvent en communication avec des substances qui réagissent les unes sur les autres, il en résulte des composés électro-chimiques.

Parmi les substances qui se trouvent ordinairement dans les filons et qui jouissent de la propriété conductrice, nous citerons les pyrites de fer, cuivreuses et arsenicales, le peroxyde de manganèse, le fer magnétique, le cobalt arsenical, la galène, l'argent, le cuivre et l'or métallique, etc., etc. A l'exception de la plupart des composés métalliques et de quelques matières carbonacées, toutes les substances minérales, quelle que soit leur origine, ne conduisent pas l'électricité, du moins considérées en masse, car leur surface, humectée par un liquide, paraît jouir de la faculté conductrice dans des limites très-restreintes à la vérité.

Ce fait résulte de l'action exercée par un courant électrique sur des substances non-conductrices qui plongent dans de l'eau distillée; car ce courant parvient à leur enlever les bases et les acides qu'elles peuvent renfermer. Or, d'après les propriétés connues de l'électricité en mouvement, cette décomposition ne saurait avoir lieu qu'autant que l'électricité traverse les parties superficielles des corps, à moins d'admettre que certains éléments constituants de ces substances se trouvent dissous en très-faible proportion près des surfaces. La conductibilité des corps ne paraît dépendre, au surplus, que de l'arrangement des particules.

L'eau se trouve en plus ou moins grande quantité dans les diverses formations qui composent la croûte terrestre, mais principalement dans les parties composées de sable, d'argile, de roches poreuses fendillées ou en décomposition. Comme ces terrains occupent une

très-grande étendue, ils peuvent servir à transmettre l'électricité à de grandes distances.

La conductibilité du sol pour l'électricité est maintenant prouvée par des expériences faites en différents lieux; nous en citerons quelques exemples ci-après. Mais le fait le plus frappant est sans contredit celui qui résulte de la transmission du courant provenant de quelques couples, dans une longueur de terrain de plusieurs centaines de kilomètres (par exemple, le long du chemin de fer de Rouen, de Paris à cette dernière ville, sur une distance de trente lieues), et qui permet de se servir du sol comme d'un conducteur métallique dans les télégraphes électriques, en plaçant les électiodes dans un lieu humide.

Montrons maintenant comment des courants électriques peuvent circuler dans différents sens à la surface du globe. Supposons une vaste étendue de terrain argileux humide, dont une partie renferme du chlorure de sodium et dont l'autre en soit privée: la première réagira sur celle-ci de manière à lui céder une portion du composé qu'elle tient en dissolution; cette réaction s'opérera, bien entendu, sur toute la surface de contact. Pendant cette réaction, il y aura un dégagement d'électricité tel, que l'eau salée rendra libre de l'électricité positive, et l'eau pure de l'électricité négative; ces deux électricités se recombineront tumultueusement à la surface de contact, pour former du fluide neutre, sans pour cela qu'il y ait courant électrique. Admettons maintenant que la végétation se soit développée à la partie supérieure de ces argiles; des racines et des radicelles pénétreront dans l'intérieur à de très-grandes profondeurs, comme, du reste, on en a fréquemment des preuves en examinant ces terrains. Des l'instant que la végétation aura cessé, les racines se décomposeront et se changeront en matières carbonacées et conductrices de l'électricité. Ces débris de racines sont autant de conducteurs qui détermineront la circulation du fluide électrique; mais, comme les racines et radicelles affectent mille directions di-

verses, il s'ensuit qu'on aura une infinité de petits courants dont la résultante changera d'un point à un autre. Substituons, par la pensée, aux racines décomposées, des pyrites qui se trouvent souvent dans les argiles ou d'autres substances minérales conductrices apportées par les eaux et déposées par elles, telles que du peroxyde de manganèse, etc.; tous ces corps rempliront les mêmes fonctions que les racines décomposées, et seront également le lieu d'une infinité de courants électriques capables de produire des effets électro-chimiques.

Substituons aux racines décomposées, aux pyrites ou autres substances conductrices, deux lames de platine parfaitement homogènes et en relation avec les deux bouts du fil d'un multiplicateur, et supposons que l'une de ces lames soit introduite dans l'argile humectée d'eau salée, et l'autre dans l'argile qui ne renferme que de l'eau pure : il est bien évident que la première lame s'emparera de l'électricité positive que dégage le liquide renfermant du chlorure de sodium dans sa réaction sur celui qui ne l'est pas, tandis que l'autre lame s'emparera de l'électricité négative. De là, courant électrique, qui manifestera son action sur l'aiguille aimantée tant que les lames de platine ne seront pas polarisées.

Pour mettre en évidence les courants terrestres dans les circonstances que nous venons d'indiquer, nous rapporterons les trois séries d'expériences faites : 1° dans une couche étendue d'argile, dont une portion était saturée de chlorure de sodium, et dont l'autre n'en renfermait que peu ou point; 2° dans un terrain dont une partie était à une température au-dessous de 0, et l'autre à quelques degrés au-dessus; 3° dans deux portions de terrain, dont l'une était à 40 degrés environ, et l'autre à 12 degrés. Les conditions, dans le premier et le troisième cas, étaient les plus propres à donner des courants énergiques.

Les expériences de la première série ont été faites dans la mine de sel gemme de Dieuze. On sait que le sel gemme, dans cette localité comme dans tous les gise-

ments analogues, se trouve dans les marnes irisées, dont les bancs alternent avec des bancs d'argile renfermant plus ou moins de sel et une petite quantité d'eau plus ou moins salée. On se trouvait donc dans les conditions les plus favorables pour obtenir des courants énergiques. Le multiplicateur ayant été établi solidement sur le sol d'une galerie taillée dans le banc de sel, une lame de platine non polarisée en communication avec l'un des bouts du fil de l'appareil, a été appliquée sur l'une des faces de la galerie; une autre lame, également en relation avec l'autre bout du fil, a été introduite dans l'argile du sol à une distance de 55 mètres. L'aiguille aimantée fut vivement chassée et vint frapper l'arrêt en se maintenant à 90°. Le sens de la déviation était tel, que la lame en contact avec le sel gemme avait pris l'électricité positive, conséquence de la réaction de l'eau saturée sur celle qui ne l'était pas. Cette expérience fut répétée et variée de bien des manières, et les effets électriques furent toujours en rapport avec le degré de concentration des liquides humectant les argiles. Il est démontré par là de la manière la plus évidente que deux bancs d'argile humectée par de l'eau renfermant des quantités différentes de sel donnent lieu à des courants électriques quand ils sont en communication avec un corps solide conducteur, capable d'opérer la neutralisation des deux électricités.

Ces mêmes expériences ont été répétées sur la mer de glace du Montanvert, au-dessus de la vallée de Chamouny, avec le même appareil. L'une des lames de platine fut appliquée avec adhérence sur un bloc de glace; l'autre fut introduite dans la terre environ à 50 mètres de distance. La température de la terre où se trouvait la lame était alors de 11°. L'aiguille aimantée fut chassée par première projection à 40°, et se fixa à 12. Le sens de la déviation indiquait que la lame placée sur le bloc de glace avait pris l'électricité négative. L'effet produit doit être attribué non-seulement à la différence de température, mais encore à la présence des matières tenues

en dissolution dans l'eau qui humectait la terre; quant à la faible couche d'humidité qui se trouvait à la surface de la glace, elle devait être sensiblement pure.

On a opéré ensuite dans les bains d'Aix, en Savoie, où la température de certaines sources s'élève jusqu'à 50°. Après avoir fait les mêmes dispositions que précédemment, une des lames fut plongée dans l'eau de la source dite eau de soufre, dont la température était d'environ 43°, et l'autre dans de l'eau pure coulant à la surface du sol et qui marquait 13° au thermomètre. Les distances des deux stations étaient de 4 mètres en hauteur et de 6 mètres en largeur. A l'instant où le circuit fut fermé, l'aiguille frappa fortement l'arrêt et se fixa à 90°. Le sens de la déviation annonçait que la lame plongée dans la source sulfureuse chaude avait pris l'électricité négative, effet dû à la réaction de l'eau chaude sur l'eau froide, et peut-être à la nature des réactions qui avaient lieu entre les deux liquides.

Il en fut encore de même en répétant cette expérience dans d'autres sources. Ces trois séries d'expériences ont été faites dans les circonstances les plus favorables pour montrer quelles peuvent être les causes en vertu desquelles on obtient des courants électriques dans les mines, en se servant, non pas, comme on l'a fait jusqu'ici, de lames de cuivre qui donnent des effets secondaires dus à la réaction chimique du liquide sur le métal, mais bien de lames de platine dont la surface n'est point polarisée.

L'exposé précédent indique que les courants électriques terrestres ne peuvent exister que dans les circonstances analogues à celles que nous avons citées, c'est-à-dire, lorsque deux terrains en contact sont humectés l'un et l'autre avec de l'eau ne tenant pas en dissolution des composés semblables ou renfermant le même composé mais dont les proportions sont différentes, et sont traversés par des substances conductrices, telles que des matières carbonacées, des pyrites, des galènes, etc. Dans le cas où ces substances sont elles-mêmes attaquées par

l'eau et les agents qu'elle tient en dissolution, il en résulte de nouveaux effets électriques dirigés dans le même sens ou dans un sens différent de celui des effets provenant de la réaction des terrains.

Dans les exemples précédents, il n'a été question que de chaînes électro-chimiques, composées de deux liquides et d'un solide; mais on peut en composer également dans lesquelles il n'entre seulement que des solutions séparées les unes des autres par des argiles qui s'opposent à leur mélange immédiat. Ces circuits, par leur simplicité, permettent d'étendre les applications de l'électro-chimie aux phénomènes terrestres. Pour donner de suite un exemple de cette espèce de circuit, nous prendrons un tube en U, au fond duquel on a introduit de l'argile humectée avec de l'acide nitrique; dans l'une des branches on met une solution de potasse, dans l'autre de l'acide nitrique, et l'on établit ensuite la communication entre les deux branches, au moyen d'un autre tube rempli d'argile humectée avec une solution de chlorure de sodium. Au bout d'un certain temps, l'imbibition de l'acide dans une des branches, et de l'alcali dans l'autre, est telle que la première branche est de moins en moins acide, et la deuxième de moins en moins alcaline, tandis que la partie supérieure n'est ni l'un ni l'autre: il n'en faut pas davantage pour obtenir un courant électrique, capable de décomposer les oxydes métalliques ou autres corps placés dans l'argile du tube servant à établir la communication entre les deux branches du premier tube. Cet exemple servant de type à tous ceux du même genre, suffit pour montrer la possibilité d'effets électro-chimiques dans la terre, sans l'intermédiaire de corps solides. (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tome XXIV, année 1847.)

Si nous nous reportons aux effets électriques produits dans les actions chimiques, nous voyons que lorsque deux corps se combinent ensemble, les électricités mises en liberté, et dont on ne recueille qu'une excessivement faible partie, représentent exactement celles

qui constituent le pouvoir électrique de ces corps. Si donc on parvenait à les recueillir complétement, le courant qui en résulterait en décomposerait la même quantité; mais nous ne pouvons malheureusement transformer en courant qu'une très-faible portion des deux électricités dégagées, attendu qu'il se produit au contact des corps une foule de recompositions qui diminuent d'autant l'intensité du courant principal. D'après cela, plus on affaiblit le nombre des recompositions, plus l'intensité du courant augmente. On remplit cette condition en disposant les appareils pour que les électricités dégagées parcourent le plus petit espace possible dans le liquide. On ne doit jamais perdre de vue ce principe dans les recherches électro-chimiques. Les expériences suivantes, basées sur ces principes, montreront les principales circonstances dans lesquelles l'électricité intervient comme force chimique.

§ IV. — *Des formations électro-chimiques.*

Des métaux cristallisés. — Si on verse avec précaution, sur une solution de sulfate ou de nitrate de cuivre concentrée, de l'eau pure ou renfermant une petite quantité de chlorure de sodium, et qu'on plonge dans les deux liquides un fil de cuivre, en évitant de les mêler, on ne tarde pas à apercevoir que le bout du fil qui se trouve dans la dissolution de cuivre se couvre peu à peu de cuivre, et que l'autre bout s'oxyde. Cette décomposition est due à l'action d'un appareil électro-chimique, composé des deux liquides et du métal, et qui fonctionne en vertu de la réaction l'un sur l'autre des deux liquides, et de l'eau salée sur le métal; le bout du fil en contact avec la dissolution de cuivre est le pôle négatif; dès-lors, il doit se recouvrir de cuivre réduit.

Pour avoir une action longtemps prolongée, afin d'obtenir de gros cristaux, on prend un tube en U, rempli dans sa partie inférieure d'argile humectée. Dans l'une des branches on verse une solution de sulfate de cuivre, et dans l'autre une solution étendue de chlorure

de sodium; puis l'on plonge dans chaque liquide le bout d'une lame de cuivre. Les mêmes effets que ci-dessus se reproduisent, mais beaucoup plus lentement, l'argile s'opposant au mélange des liquides. On finit par obtenir des cristaux octaédriques de cuivre de plusieurs millimètres de côté. Presque tous les métaux peuvent être obtenus cristallisés par ce procédé, que la nature a dû et doit encore employer pour amener à l'état métallique le cuivre, l'argent, etc., les métaux enfin, peu ou point oxydables, dont les composés trouvent un dissolvant dans la terre, attendu qu'il est difficile d'en imaginer un qui réunisse des conditions plus analogues à celles que l'on rencontre dans les mines.

Des oxydes métalliques cristallisés.

Nous commencerons par le protoxyde de cuivre. On prend un tube de verre, fermé à l'un de ses bouts, au fond duquel on met du deutoxyde de cuivre, et on le remplit d'une solution de nitrate de cuivre saturée. On y plonge ensuite une lame de cuivre, de manière qu'elle soit en contact avec le deutoxyde, et l'on ferme le tube hermétiquement. Quelques jours après, on commence à apercevoir sur la lame de cuivre des petits cristaux octaédriques, brillants, d'un rouge foncé, de protoxyde de cuivre. Ces cristaux augmentent peu à peu de grosseur.

Il se passe des effets différents, suivant la quantité plus ou moins grande de deutoxyde de cuivre renfermée dans le tube. S'il y en a un grand excès, il y a d'abord production et cristallisation de protoxyde; la dissolution se décolore peu à peu jusqu'à devenir incolore, et l'on finit par apercevoir sur les parois intérieures du tube des cristaux de nitrate d'ammoniaque. A ce moment, la liqueur ne renferme plus qu'une solution saturée de ce sel, et seulement quelques traces de cuivre. Il s'écoule quelquefois un assez grand laps de temps avant que la solution de nitrate d'ammoniaque cristallise. Tout ceci se passe, bien entendu, sans le contact de l'air, puisque

le tube est fermé hermétiquement; l'ammoniaque a dû être formée aux dépens de l'hydrogène de l'eau, qui est décomposée, et de l'azote de l'acide nitrique.

Quand la quantité de deutoxyde est très-faible, les cristaux de protoxyde se forment également sur la lame de cuivre; mais peu à peu ils perdent de leur éclat, et finissent par éprouver une altération qui s'arrête à un certain point; la dissolution reste toujours colorée. L'expérience est alors terminée, et le temps n'apporte plus aucun changement dans la dissolution.

Tous ces effets sont faciles à expliquer. Le tube de verre renferme du deutoxyde de cuivre, une dissolution saturée de nitrate de cuivre, et une lame de cuivre en contact avec l'un et l'autre. Le deutoxyde s'emparant d'une portion de l'acide du nitrate qui devient sous-nitrate, la partie de la lame qui touche le deutoxyde se trouve en contact avec une portion de la dissolution de nitrate de cuivre, qui est moins saturée que celle où plonge le bout supérieur : de là courant électrique, puisque la lame de cuivre se trouve plongée dans deux solutions qui ne sont pas saturées au même degré. Le bout supérieur est le pôle négatif, tandis que celui du bas est le pôle positif. Le premier doit attirer par conséquent le cuivre ou ses oxydes, et le second l'acide; c'est précisément ce qui arrive. On voit donc qu'il est tout simple que le protoxyde de cuivre se dépose sur la partie supérieure de la lame. L'action doit être excessivement faible d'abord, attendu que le deutoxyde, surtout quand il est anhydre, agissant difficilement sur l'acide du nitrate, la différence entre ces deux liquides est très-petite; mais, le nitrate perdant peu à peu son acide, qui n'est remplacé que difficilement par celui de la partie supérieure, la différence entre le degré de concentration des deux dissolutions augmente; l'action chimique de l'appareil est en rapport avec cet état de choses : aussi, à la fin de l'opération, aperçoit-on quelquefois des cristaux de cuivre, surtout dans la partie supérieure. Cette marche étant graduelle, on doit obtenir

cristallisées toutes les bases, depuis le protoxyde jusqu'au métal.

Quelle que soit la durée de l'expérience, il ne se dégage aucun gaz. L'oxygène, qui provient de la réduction du deutoxyde du nitrate en protoxyde, se porte sur la partie inférieure de la lame, pour l'oxyder et former du sous-nitrate avec l'acide nitrique provenant de la décomposition électro-chimique du nitrate.

C'est par ce moyen qu'on pourra arriver à obtenir cristallisés les divers oxydes d'un métal et à distinguer des principes immédiats dans les composés organiques. Avec une solution de sulfate de cuivre, on a également des cristaux de protoxyde, mais pas aussi rapidement. Dans les galeries de pyrites cuivreuses, où il existe très-fréquemment du sulfate de cuivre, et quelquefois du cuivre métallique, on conçoit que des conditions semblables à celles que nous venons de faire connaître déterminent la production de cristaux de protoxyde de cuivre.

Pour obtenir cristallisé le protoxyde de plomb, on prend un tube de verre de quelques millimètres de diamètre, fermé par un bout; et l'on met au fond de la litharge pulvérisée, environ un centimètre de haut. On verse dessus une solution peu étendue de sous-acétate de plomb, et l'on plonge dedans une lame de plomb, de manière à la mettre en contact avec la litharge. Le tube est ensuite fermé hermétiquement. Peu à peu la surface de la lame se recouvre de petites aiguilles prismatiques d'hydrate de plomb; quelquefois on aperçoit du plomb réduit; enfin, mais plus rarement, il se dépose des cristaux dodécaèdres, à faces pentagonales, très-limpides, de protoxyde, qui, au contact de l'air, perdent leur transparence. Ces produits sont le résultat d'actions analogues à celles qui ont présidé à la formation du protoxyde de cuivre.

On a plusieurs procédés pour obtenir cristallisé l'oxyde de zinc :

Premier procédé. — On prend deux petits flacons,

dont l'un renferme une dissolution de zinc dans la potasse, et l'autre une solution de nitrate de cuivre. On établit la communication entre elles au moyen d'un tube recourbé, rempli d'argile humectée d'une solution de nitrate de potasse; on plonge une lame de plomb dans la dissolution de zinc, et, dans la dissolution de nitrate de cuivre, une lame de cuivre, que l'on met en communication avec l'autre lame. Le nitrate de cuivre est décomposé sous l'influence du courant provenant de la réaction de l'alcali sur le plomb; l'oxygène et l'acide nitrique sont transportés sur la lame de plomb, et donnent naissance à du nitrate de potasse et à de l'oxyde de plomb; qui se dissout dans l'alcali. Peu à peu il se dépose sur la lame de plomb des petits cristaux limpides d'oxyde de zinc, ayant la forme de prismes aplatis et rayonnant d'un centre. L'oxyde de plomb exerce donc, à mesure qu'il se forme, une action répulsive sur l'oxyde de zinc.

Deuxième procédé. — On prend une dissolution de silice dans la potasse marquant environ 20 à 25 degrés, dans laquelle on plonge une lame de zinc amalgamé, entourée d'un fil de cuivre, constituant ainsi un couple voltaïque. L'eau est immédiatement décomposée, avec dégagement abondant de gaz hydrogène; après un certain nombre de jours, qui dépend du volume de la dissolution, le zinc se recouvre, ainsi que les parois du bocal, d'une grande quantité de jolis petits octaèdres réguliers très-limpides, et jouissant d'un grand pouvoir dispersif. On obtient des cristaux qui ont 1 millimètre de côté. Ces cristaux sont composés de 18 parties d'eau et de 82 d'oxyde de zinc; l'eau renferme donc autant d'oxygène que l'oxyde anhydre. Leur dureté est assez grande pour rayer le verre. Cette propriété est d'autant plus remarquable, que l'on ne connaît pas d'hydrate préparé par les moyens ordinaires de la chimie qui la possède à un degré aussi marqué. On se rend compte ainsi des effets produits : le zinc, en raison de son contact avec le cuivre, devient assez positif pour décomposer l'eau

avec dégagement abondant de gaz hydrogène. Peu à peu la dissolution potassique se sature d'oxyde de zinc : aussitôt que la saturation est effectuée, la cristallisation commence; l'action électro-chimique intervient, dans cette circonstance, pour activer l'action de l'eau sur le zinc. Cette action est tellement vive, que le dégagement de gaz continue sans diminution sensible jusqu'à ce que tout le zinc ait disparu. Sa surface, comme on le conçoit très-bien, ne pouvant se polariser, la décomposition doit marcher d'une manière uniforme.

Il est nécessaire, avons-nous dit, d'opérer avec une solution de silice dans la potasse, et que cette solution marque de 20 à 25 degrés à l'aréomètre. En effet, si l'on prend une dissolution potassique ayant la même densité, saturée ou non préalablement d'oxyde de zinc, mais sans silice, le couple zinc et cuivre décompose encore abondamment l'eau; mais l'oxyde de zinc se précipite au fond du verre sans apparence de cristallisation. La silice paraît agir, dans cette circonstance, pour faire prendre aux molécules d'oxyde de zinc un groupement régulier. Son mode d'action est purement physique. On arrive au même résultat avec une solution potassique d'alumine, si ce n'est que la cristallisation n'est pas aussi nette.

Voilà ce qui se passe quand la solution marque de 20 à 25 degrés à l'aréomètre; mais si l'on dépasse ce terme, et que l'on opère avec des solutions de 30, 35, 40, 45 degrés, on n'obtient jamais de cristaux, du moins dans les limites de temps où ils se sont produits avec l'autre solution. Il se passe alors un phénomène qui mérite d'être signalé : aussitôt qu'une certaine quantité d'oxyde de zinc a été dissoute, il se précipite du zinc sur le cuivre. Or, comment peut-il se faire que le courant résultant de l'oxydation du zinc ait une intensité suffisante pour décomposer l'oxyde de zinc lui-même? Jusqu'ici un sel métallique n'a été décomposé, avec réduction de son oxyde, dans l'appareil simple, qu'en employant un courant électrique produit par l'oxydation

d'un métal plus oxydable que celui qui est en combinaison. Cet effet dépend probablement de ce que toutes les parties de la surface du métal ne sont pas également attaquées, ou de ce que le décapage a mis à découvert, çà et là, des alliages.

L'oxyde de plomb hydraté peut être obtenu également cristallisé par ce procédé.

Si l'on abandonne aux actions spontanées une solution de protoxyde d'étain dans laquelle on a mis un couple étain et cuivre, l'étain s'oxyde peu à peu, et, au bout d'un certain temps, les parois du bocal se recouvrent, comme dans l'expérience avec le zinc, de cristaux de protoxyde d'étain. Dans la nature, le zinc, l'étain, ne se trouvent pas à l'état métallique, mais il n'en est pas de même de leurs oxydes, qui en présence d'eaux minérales alcalines, hors du contact de l'air, peuvent donner lieu à des effets semblables.

Des chlorures métalliques. — Nous avons déjà dit que lorsqu'un métal est très-faiblement attaqué par un liquide, si on le met en contact avec un corps conducteur, tel que l'anthracite ou le charbon, non attaqué par ce liquide, l'action chimique acquiert plus de force, par suite des effets électro-chimiques qui en résultent, et les produits deviennent appréciables. Dans cette circonstance, l'électricité dégagée dans le jeu des affinités vient en aide à celles-ci; nous appliquerons ce principe à la formation des chlorures d'argent et de cuivre, dont il a déjà été fait mention. Dans un tube de verre, fermé par un bout, on verse de l'acide chlorhydrique concentré, et l'on plonge dedans une lame d'argent, fixée avec un fil de même métal à un morceau d'anthracite ou de charbon; on ferme le tube, en laissant seulement une très-petite ouverture pour donner issue aux gaz qui se dégagent. L'argent étant le pôle positif du couple, attire le chlore et se combine avec lui, tandis que l'hydrogène se porte sur le carbone et il se dégage. Le chlorure d'argent formé cristallise en jolis octaèdres translucides, qui, avec le temps, acquièrent deux à trois millimètres de

côté. Si l'on substitue une lame de cuivre à la lame d'argent, on obtient des effets analogues, c'est-à-dire que peu à peu la lame se recouvre de beaux cristaux tétraèdres de protochlorure de cuivre très-brillants, possédant une grande réfrangibilité. Si l'on continue l'expérience sans le contact de l'air, la liqueur change de couleur, devient brun foncé, et les cristaux ne sont plus visibles; il se forme alors une combinaison qui n'a pas encore été examinée. Ces expériences montrent l'influence du contact, pour déterminer la formation de composés analogues à ceux que l'on trouve dans les filons.

Des sels doubles. — Servons-nous toujours du tube recourbé en U, rempli dans sa partie inférieure d'argile humectée d'eau; on met dans une des branches du nitrate de cuivre, dans l'autre une solution du chlorure que l'on veut soumettre à l'expérience, du chlorure de sodium par exemple; puis l'on plonge dans chacune d'elles le bout d'une lame de métal, tel que le cuivre, et l'on ferme les deux ouvertures avec des bouchons. Bientôt après, par suite de la réaction des deux solutions l'une sur l'autre et de la solution de chlorure sur le cuivre, le bout qui est plongé dans la solution du nitrate devient le pôle négatif d'un petit couple et se recouvre de cuivre à l'état métallique; l'acide nitrique et l'oxygène sont transportés dans la branche positive, où ils concourent l'un et l'autre aux réactions chimiques suivantes : L'acide nitrique décompose une portion du chlorure de sodium, et l'oxygène oxyde le sodium; le chlorure se porte sur le cuivre, et il se forme du protochlorure de cuivre, qui se dissout dans l'eau salée, et du nitrate de soude. Il arrive un instant où, en raison de la saturation, il se dépose des cristaux de double chlorure de cuivre et de sodium sur la lame de cuivre. Le succès de l'expérience dépend de l'obstacle que l'on oppose au mélange des liquides contenus dans les deux branches du tube, sans nuire au transport de l'oxygène et de l'acide nitrique au pôle positif. A la fin de l'opéra-

tion, il se forme de l'oxy-chlorure de cuivre qui cristallise quelquefois.

Les chlorures de calcium, de potassium, de baryum, de strontium, de magnésium, le chlorhydrate d'ammoniaque, donnent avec le cuivre des produits analogues, c'est-à-dire des doubles chlorures, qui cristallisent de même en tétraèdres réguliers. L'argent, avec les mêmes chlorures, ainsi que le plomb, donnent aussi des combinaisons isomorphes semblables aux précédentes. Le double chlorure de potassium et d'étain cristallise en aiguilles prismatiques.

En suivant les mêmes principes, on forme des doubles sulfures, doubles iodures, doubles bromures. Ces doubles combinaisons sont nécessaires en électro-chimie pour arriver aux sulfures et iodures, bromures métalliques simples, comme nous allons le montrer. Faisons-en une application aux surfaces :

On prend un tube en U préparé avec de l'argile, comme ci-dessus. Dans l'une des branches on verse une solution de protosulfure de potassium; dans l'autre, une dissolution assez concentrée de nitrate de cuivre. Dans la première on plonge une lame d'argent, dans l'autre une lame de cuivre. Par suite des effets électro-chimiques produits, il se dépose du cuivre sur la lame de cuivre; sur la lame d'argent, des cristaux de double sulfure d'argent et de potassium, et quelquefois des cristaux octaédriques de sulfure d'argent, suivant le degré de concentration de la solution de sulfure de potassium. L'action continuant, la lame se change en sulfure d'argent par un effet de cémentation. Voici ce qui se passe, soit qu'il se forme en premier lieu un double sulfure, soit qu'il ne se produise qu'un sulfure; admettons d'abord cette dernière production. Par suite des effets électro-chimiques produits, le nitrate de cuivre est décomposé; il y a dépôt de cuivre sur la lame de ce métal; l'oxygène et l'acide nitrique sont transportés sur l'argent; l'oxygène oxyde le potassium, et l'acide nitrique se combine avec la potasse, tandis que le soufre, élément élec-

tro-négatif, est attiré par l'argent, pôle positif, se combine avec lui, et forme du sulfure qui cristallise en octaèdres réguliers. Une fois la surface de l'argent recouverte d'une couche de sulfure, qui ne fait qu'y adhérer, le soufre se glisse ensuite entre les interstices des petits cristaux formés, et donne naissance à une seconde couche de cristaux; ainsi de suite jusqu'au centre de la lame, qui augmente de volume sans changer de forme. La réunion de tous ces dépôts successifs forme une masse cristalline dont les parties ont quelquefois une certaine adhérence. Voilà une véritable cémentation. S'il y a en premier lieu formation de double sulfure, le double sulfure est décomposé peu à peu, et le sulfure d'argent est isolé.

Avec le cuivre, les effets varient suivant que l'on opère avec une solution de persulfure de potassium concentrée ou une solution de protosulfure également concentrée. Dans le premier cas, il y a formation de belles aiguilles blanches radiées de double sulfure de potassium et de cuivre. Quelquefois il arrive que la lame de cuivre qui se trouve dans la solution de sulfure, se recouvre de petits tubercules de soufre. En continuant l'opération, l'acide nitrique et l'oxygène réagissent sur les produits formés, les décomposent, donnent naissance à du sulfate et du nitrate de potasse, puis à des cristaux irisés de sulfure de cuivre, mêlés quelquefois à du soufre en aiguilles. Avec le protosulfure de potassium, les réactions sont les mêmes qu'avec l'argent, c'est-à-dire qu'il se forme immédiatement un sulfure de cuivre cristallisé, d'un aspect gris métallique.

Le plomb, avec le protosulfure de potassium, donne lieu d'abord à des réactions analogues à celles de l'argent, avec cette différence, néanmoins, que le sulfure est d'abord pulvérulent; mais quand la dissolution est devenue moins concentrée, il se forme des masses tuberculeuses de sulfure de plomb brillant, d'un aspect cristallin semblable à celui de la galène. On obtient aussi quelquefois un double sulfure de plomb et de potassium en aiguilles blanches.

En général, les substances formées ont l'aspect de celles qui leur correspondent dans la nature. (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. VIII, p. 783.)

Dans les fosses d'aisance où séjournent des pièces d'argent ou de cuivre, tombées par accident, ou dans les filons renfermant ces deux métaux, et traversés par des eaux sulfureuses, il doit se produire des effets absolument semblables.

Des iodures métalliques. — On sait que les iodures métalliques sont soumis à la même loi de composition que les sulfures. On doit donc se procurer les iodures insolubles par le même procédé que celui qui a servi pour les sulfures : ce n'est là qu'une généralisation du principe. Pour l'iodure de plomb, on substitue, dans l'appareil électro-chimique, l'iodure de potassium ou de sodium au sulfure alcalin ; puis on plonge dans la branche du tube en U, où se trouve la solution de nitrate de cuivre, une lame de cuivre, et dans l'autre, qui contient une solution d'iodure de potassium, une lame de plomb. On obtient d'abord dans celle-ci un double iodure de plomb et de potassium, qui cristallise en aiguilles blanches soyeuses très-fines ; peu à peu cette combinaison se décompose, en commençant par la partie inférieure contiguë à l'argile ; puis l'on aperçoit un grand nombre de cristaux dérivant de l'octaèdre régulier, d'un jaune d'or et d'un aspect brillant, qui appartiennent au proto-iodure de plomb.

Le cuivre, soumis au même mode d'action, donne d'abord un double iodure en aiguilles blanches cristallisées, puis l'on obtient, après la décomposition, de jolis cristaux octaèdres. L'iodure d'argent s'obtient aussi facilement.

Il est probable que les autres métaux dont les iodures sont insolubles, avec des précautions convenables, donneraient des résultats semblables. Les bromures, les séléniures insolubles peuvent sans doute être obtenus par le même procédé. Nous nous bornons à en faire mention ici, parce que leur formation découle d'un principe général que nous avons suffisamment développé dans ce chapitre pour ne pas devoir entrer dans de nouveaux

détails à cet égard. Ce principe, qui a pour but de former d'abord des doubles composés pour arriver aux composés simples, a sans aucun doute des applications dans la nature.

Du phosphate de chaux.—L'électro-chimie peut obtenir ce composé cristallisé avec assez de facilité : nous indiquerons d'abord le procédé tel qu'on le pratique dans les laboratoires, et nous essayerons ensuite de démontrer si la nature peut l'imiter. On prend à cet effet un bocal à moitié rempli d'une solution saturée de chlorure de calcium, dans laquelle on plonge une lame de zinc et un tube fermé inférieurement avec du kaolin humecté de la même solution, et contenant une solution de phosphate de chaux dans l'acide phosphorique très-étendu. On ferme le circuit avec une lame de platine plongeant dans la solution acide et communiquant avec la lame de zinc au moyen d'un fil de platine. La décomposition du chlorure de calcium commence aussitôt, en même temps que celle de l'eau; la chaux est transportée dans le tube, où elle sature peu à peu l'excès d'acide, et le phosphate de chaux, qui n'est plus tenu en dissolution par cet excès d'acide, cristallise peu à peu sur la lame de platine en prismes rectangulaires obliques à sommets dièdres. Les prismes sont quelquefois tellement aplatis qu'ils ont l'aspect de lames rectangulaires terminées en biseaux. Ils appartiennent au phosphate neutre de chaux. Passons à la formation de ce composé dans la nature. Il existe, comme on le sait, en dissolution dans plusieurs eaux minérales par l'intermédiaire de l'acide carbonique. Pour connaître en vertu de quelles réactions il peut être produit, nous avons placé dans un flacon d'une capacité d'environ 20 centimètres cubes une solution saturée de phosphate de soude et un morceau de chaux sulfatée (gypse) anhydre. Deux ans après, ce dernier ne présentait qu'une très-légère apparence de décomposition ; mais peu à peu il s'est manifesté des points brillants, et, au bout de onze ans, la surface était recouverte de cristaux de phosphate neutre absolument semblables à ceux obtenus par le

procédé électro-chimique, sous le rapport de la forme et de la composition. Cette formation est évidemment le résultat d'une double décomposition opérée très-lentement, et qui, n'ayant pas été troublée, a dû être suivie d'une cristallisation. Rien ne s'oppose à ce que, dans la nature, de semblables réactions se produisent, et que le phosphate de chaux, qui est en dissolution dans certaines eaux minérales, n'ait une semblable origine.

D'après le fait que nous venons de rapporter, il est impossible que le phosphate de soude et le sulfate de chaux, dans la terre, en présence de l'eau, ne réagissent l'un sur l'autre par voie de décomposition, de manière à produire du sulfate de soude et du phosphate neutre de chaux qui reste en solution dans l'eau à la faveur de l'acide carbonique. La double décomposition résulte du faible pouvoir dissolvant exercé par l'eau sur le sulfate de chaux.

L'expérience suivante va mettre encore en évidence l'influence de l'électricité sur la formation du phosphate de chaux, dans le premier cas. Quand on dissout le phosphate dans un acide et qu'on verse dans la dissolution un excès d'ammoniaque, on obtient du sous-phosphate calcique des os. Rien de semblable n'a lieu en substituant, dans l'appareil précédemment décrit, du chlorhydrate d'ammoniaque au chlorure calcique, afin de faire arriver dans la dissolution de phosphate, de l'ammoniaque au lieu de chaux; car on obtient toujours cristallisé le phosphate neutre. On voit donc que, outre l'intervention de la chaux et de l'ammoniaque pour saturer l'excès d'acide, le courant réagit encore sur le phosphate acide pour le décomposer électro-chimiquement; l'acide se rend sur le zinc, et le phosphate sur la lame de platine, où il cristallise.

§ V. — *De l'action des courants produits par l'électricité à faible tension sur les substances insolubles.*

Dans un tube de quelques millimètres de diamètre, on a mis du sulfure noir de mercure sur lequel on a

versé une solution saturée de sel marin, puis on a plongé dedans une lame de cuivre, et l'on a fermé ensuite hermétiquement le tube. Bien que le sulfure de mercure ne soit pas soluble dans le sel marin et que celui-ci n'attaque pas sensiblement le cuivre hors du contact de l'air, cependant les diverses réactions chimiques faibles et les effets électriques qui ont lieu au contact du cuivre, du sulfure de mercure, de l'eau et du chlorure de sodium, produisent les effets suivants : décomposition du sulfure, cristallisation d'un amalgame de cuivre sur la lame de cuivre et les parois du tube; les cristaux dérivent de l'octaèdre régulier. L'opération continue depuis quinze ans, et les effets paraissent de plus en plus sensibles.

En mettant dans un tube de verre du carbonate de cuivre, une solution saturée de sel marin, une lame de fer, fermant hermétiquement, on obtient les effets suivants. Peu à peu le carbonate de cuivre, de bleu est devenu noir, la lame s'est recouverte de cuivre métallique, et la décomposition a fini par être complète. Il est hors de doute que dans les diverses réactions qui ont eu lieu au contact de l'eau, du sel marin, du carbonate de cuivre et du fer, le carbonate hydraté n'ait été d'abord décomposé sous l'influence voltaïque en eau et en carbonate anhydre, c'est-à-dire que l'eau n'ait été transportée sur le fer à la manière des acides, puis décomposée. Quand l'expérience se fait au contact de l'air, il se précipite de l'oxyde de fer.

En substituant au fer une lame de plomb, il y a également décomposition du carbonate de cuivre, sans qu'on observe bien sensiblement le passage du carbonate hydraté au carbonate anhydre, puis formation de double chlorure de plomb et de sodium qui cristallise en jolis rhomboèdres, de carbonate de plomb et probablement de chloro-carbonate en cristaux aciculaires. La liqueur devient légèrement alcaline par suite de la soude mise à nu. Les diverses substances qui résultent des réactions électro-chimiques sont tellement mêlées les unes avec

les autres, qu'il est très-difficile de les séparer pour en faire l'analyse.

Prenons actuellement du carbonate d'argent, de l'eau distillée et une lame de plomb, le tout disposé comme dans l'expérience précédente. Le carbonate ne tarde pas à être décomposé; la partie adhérente au verre forme en divers endroits une surface continue et brillante comme si le verre était étamé, preuve certaine de l'influence électro-chimique sur les phénomènes produits. La lame de plomb se recouvre de carbonate hydraté de plomb en petites lamelles nacrées. Ce carbonate, comme celui de cuivre, ne peut être décomposé qu'en admettant que les effets électriques produits dans l'oxydation du métal au contact de l'eau et de l'air, soient capables de séparer les éléments des composés métalliques insolubles soumis à leur action.

En substituant au plomb une lame de cuivre ou de fer, le carbonate d'argent est encore décomposé, mais plus rapidement encore qu'avec le plomb. Une partie du gaz acide carbonique se dégage; l'autre forme avec l'oxyde de cuivre du carbonate vert, qui se change peu à peu en carbonate bleu, sous la forme de cristaux microscopiques. L'argent métallique résultant de la décomposition du carbonate est mêlé de très-petits cristaux de protoxyde de cuivre, provenant probablement de la décomposition du carbonate de même métal nouvellement formé et de celui qui se trouvait dans le carbonate d'argent.

Les silicates des métaux dont les oxydes sont facilement réductibles sont également décomposés dans leur contact avec l'eau et des lames de métal oxydable. Nous citerons particulièrement les silicates de cuivre, d'argent et de plomb, mis en contact avec des lames de plomb, de fer, de zinc et de cuivre.

Le silicate de cuivre est décomposé par les lames de fer et de plomb : l'oxyde métallique est réduit, et la silice se dépose sous forme gélatineuse. En opérant très-lentement, on obtiendrait peut-être sinon des cristaux de quartz, du moins d'hydrate de silice.

Si l'on opère avec une lame de zinc, recouverte ou non de cuivre dans la partie en contact avec le silicate, il se produit des effets qui ne pouvaient être prévus *à priori*. La lame ne tarde pas à prendre une couleur bleue très-intense, tirant sur le noir, tant qu'elle se trouve dans l'eau; mais si on l'en retire et qu'on la fasse sécher, la couleur bleue est bien manifeste. La surface du zinc se recouvre de petits tubercules bleus qui font effervescence avec tous les acides, et donnent des sels de cuivre. Traités par l'ammoniaque, ils s'y dissolvent en partie et laissent du cuivre métallique dans un grand état de division. Dès-lors, dans la réaction très-lente du zinc sur le silicate de cuivre par l'intermédiaire de l'eau distillée, il se dépose du cuivre métallique, du deutoxyde anhydre de cuivre dont une partie se combine avec l'acide carbonique transmis à l'eau par l'air. Or, comme la réaction s'opère dans toute l'étendue de la lame, bien qu'elle ne soit en contact que dans une petite partie avec le silicate de cuivre, il faut donc admettre que ce dernier soit faiblement soluble dans l'eau à l'aide de l'acide carbonique de l'air.

En substituant, au silicate, l'oxyde de cuivre hydraté ou de carbonate vert de cuivre, l'oxyde est réduit sans qu'il y ait formation de carbonate bleu, et il se dépose sur la lame de zinc des grains cristallins de carbonate de zinc. L'eau est également décomposée, mais moins abondamment.

Les arséniates et les phosphates des métaux peu oxydables ont été soumis également avec succès au même mode d'expérimentation, particulièrement les sous-arséniate et sous-phosphate d'argent : leur décomposition s'est effectuée assez rapidement; l'oxyde d'argent a été réduit, l'acide devenu libre s'est combiné avec l'oxyde nouvellement formé. En employant une solution de chlorure de sodium, au lieu d'eau distillée, on obtient des doubles combinaisons.

Avec l'arséniate d'argent, l'eau distillée et le plomb, il se dépose sur celui-ci des lamelles cristallines d'un

blanc nacré d'arséniate de plomb; l'eau est devenue assez fortement acide par la présence de l'acide arsénique. Or, comme un atome d'arséniate d'argent, quand il est décomposé par le plomb, doit donner naissance à un atome d'arséniate de plomb, il faut donc que l'arséniate formé ne soit qu'un sous-sel; la quantité que l'on en a obtenue est encore trop faible pour que l'on puisse en faire l'analyse.

En opérant avec l'arséniate d'argent, l'eau distillée et une lame de cuivre, le sel métallique est également décomposé; l'oxyde d'argent est réduit, et il se forme des cristaux aciculaires d'arséniate de cuivre d'un vert tendre.

Avec le chromate d'argent, l'eau distillée et une lame de plomb, le chromate n'a pas tardé à être décomposé : il s'est déposé sur la paroi inférieure du verre des lamelles cristallines d'argent; l'acide chromique devenu libre s'est combiné avec l'oxyde de plomb formé aux dépens de l'oxygène et de l'oxyde d'argent. Il en est résulté un chromate de plomb jaune qui s'est changé peu à peu en chromate d'un rouge orangé, en cristaux aciculaires.

Ces expériences variées de mille manières, donnent naissance à des produits électro-chimiques qui ne peuvent manquer d'intéresser la géologie.

On peut opérer également sur des composés insolubles qui ne renferment pas d'oxyde métallique, tels que l'iodure de soufre qui laisse dégager facilement de l'iode. Si, après avoir broyé cette substance en parties très-ténues, on la met dans un tube de verre avec de l'eau et une lame de plomb, l'eau se charge peu à peu d'iode, et il se forme promptement des cristaux d'iodure de plomb de plusieurs millimètres d'étendue; des cristaux d'iode très-nets se déposent sur le plomb et sur la paroi du tube, tandis que le soufre est mis sensiblement à nu.

En substituant au plomb une lame d'étain, la décomposition de l'iodure de soufre dans un tube à petits diamètres paraît marcher plus rapidement. Dans l'espace de vingt-quatre heures, il se dépose sur la lame des ai-

guilles d'un periodure d'étain, de couleur orangée, qui deviennent jaune clair en les traitant avec l'eau bouillante.

Avec le cuivre, on obtient des effets analogues.

§ VI. — *De la cémentation considérée comme phénomène électrique.*

Les molécules des corps peuvent être soumises, sous l'influence de la chaleur, de la lumière et d'autres causes, à des mouvements d'oscillation qui changent leur position naturelle d'équilibre et constituent alors des formes appartenant à un autre système cristallin, bien que la composition n'ait pas changé.

M. Haidinger cite des faits extrêmement curieux qui viennent à l'appui de ce que nous venons de dire (1). Il a trouvé que certains cristaux peuvent changer de forme en modifiant quelques-unes des circonstances qui président à leur production, sans pour cela que leur composition éprouve des changements. Le sulfate de zinc en est un exemple. Toutes les fois que la solution de ce sel n'est pas assez concentrée pour qu'il se forme une pellicule à la surface, et que la température est maintenue au-dessous de 52° centigrades, on a des cristaux qui dérivent d'une pyramide à quatre faces scalènes, dont les trois axes sont perpendiculaires entre eux. En maintenant la température à un degré plus élevé, les cristaux dérivent encore d'une pyramide à quatre faces scalènes, dans laquelle l'axe est incliné sur la base. Dans les deux cas, la composition des cristaux est la même.

Si l'on élève la température des cristaux de la première espèce au-dessus de 52°, certains points de leur surface deviennent opaques, et l'on voit rayonner de chacun d'eux des cristaux qui appartiennent à la seconde espèce.

On a observé aussi depuis longtemps que lorsque

---

(1) *Transact. d'Édimb.*, t. X.

l'arragonite est exposée à la chaleur, elle devient opaque et éclate en mille petits fragments avant de perdre aucune portion de son acide carbonique. Il est très-probable que dans ce cas elle est transformée en spath calcaire, qui occupe un plus grand espace que l'arragonite, dans le rapport de 29 à 27.

Or, si l'on réfléchit qu'il y a production d'effets électriques toutes les fois que l'équilibre naturel des molécules est troublé, on doit être assez disposé à croire que l'électricité pourrait intervenir dans l'acte de la cémentation, par cela même qu'il y a des molécules transportées à travers les corps et d'autres qui sont enlevées. Prenons l'exemple de cémentation le plus anciennement connu, celui que nous offre l'acier pendant sa formation. M. le Play pense que le gaz oxyde de carbone est l'agent qui pénètre successivement dans le fer, auquel il abandonne une portion de son carbone pour se changer en gaz acide carbonique, lequel étant expulsé, se change, dans son contact avec le charbon, en oxyde de carbone, qui retourne dans le fer pour continuer la cémentation, et ainsi de suite.

Il faut admettre, pour que les choses se passent ainsi, que lorsque la température du fer est portée au rouge, ses molécules sont assez éloignées pour laisser passer le gaz oxyde du carbone, ou le gaz acide carbonique : s'il en était ainsi, il faudrait qu'il en fût de même dans mille autres cas où le phénomène se produit à la température ordinaire dans la nature, ce qu'il est bien difficile d'admettre. Nous ne prétendons pas du tout infirmer en rien la théorie de M. Play, nous nous bornons seulement à citer des faits qui ne permettent pas de supposer qu'elle soit l'expression vraie de ce qui se passe dans toutes les cémentations. Indiquons comment nous envisageons le phénomène, sans rien préjuger sur la nature des atomes des corps : une foule de faits nous indiquent, comme nous l'avons déjà dit, qu'à l'instant où l'action chimique s'exerce entre un acide et un alcali, les particules acides, qui sont toujours environnées

d'une certaine quantité de fluide naturel, dépendante de leur nature, perdent l'électricité positive et conservent l'électricité négative, qui est nécessaire au maintien de la combinaison. Les particules alcalines conservent également leur électricité positive. Quand la combinaison est effectuée, ces deux électricités, quels que soient leurs rapports avec les atomes, se trouvent neutralisées par leur attraction réciproque. Que se passe-t-il dans la combinaison du fer avec le carbone, sous le rapport des effets électriques? Le carbone rend libre de l'électricité positive, le fer de l'électricité négative.

Partons de cette donnée et des phénomènes électriques de transport, pour montrer comment l'électricité peut intervenir dans la cémentation. Soient $f, f, f, f', f'f'$, (pl. II, fig. 8), deux groupes d'un certain nombre d'atomes de fer; c, c, c, c', c', c', des atomes de carbone, avec lesquels ils se combinent pour produire de l'acier.

Dès l'instant que fc, fc, fc, sont combinés ensemble, f, f, f, sont environnés d'une certaine quantité d'électricité positive, c, c, c, d'électricité négative. Ces deux quantités se neutralisant l'une l'autre, les atomes composés fc, fc, fc, doivent se trouver dans un équilibre instable à l'égard de $f', f'\ f'$ et de c', c', c', attendu que la force d'agrégation qui les unissait à f', f', f', à c', c', c', doit être très-affaiblie, en raison de la combinaison de f avec c, etc.; par suite de cette instabilité, fc, fc, fc, peuvent exécuter certains mouvements oscillatoires autour de leur position d'équilibre; or, dès l'instant que c, c, c, qui sont négatifs entrent dans la sphère d'activité de f', f', f', qui sont positifs, et que f, f, f, peuvent rencontrer d'autres atomes de carbone c', c', c', possédant un état électrique différent du leur, il en résulte, par suite des attractions et répulsions électriques, une combinaison de c, c, c, avec f', f', f', et de f, f, f, avec c', c', c' (fig. 8 *bis*). De cette manière, c, c, c, pénètrent dans l'intérieur du fer. En continuant le même raisonnement, on conçoit comment la seconde rangée d'atomes de carbone peut céder la place à une

autre qui arrive de l'extérieur, de sorte qu'étant poussée de proche en proche, elle pénètre jusqu'au centre de la masse de fer.

Cette hypothèse, basée sur les propriétés électriques des molécules des corps, s'applique à tous les genres de cémentation, même à celle qui s'opère à la température ordinaire. Au surplus, les expériences suivantes vont montrer comment on peut produire des cémentations au moyen de l'électricité. (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXII.)

On a pris un entonnoir dont le bec, rempli d'argile humide, plongeait dans un bocal d'eau salée où se trouvait une lame de zinc. On a mis dans l'entonnoir de l'eau et un morceau de sulfate assez volumineux de spath calcaire recouvert d'une couche assez épaisse de chlorure d'argent, et qu'on a mis en communication au moyen d'un fil d'argent avec la lame de zinc. La décomposition du chlorure d'argent a eu lieu d'abord superficiellement, puis de proche en proche, jusqu'au centre de la couche. Il en est résulté une masse d'argent assez cohérente, puisqu'elle s'est laissé couper avec un instrument tranchant. En opérant avec des courants encore plus faibles, la cohésion des molécules d'argent aurait été encore plus grande. Avec un cylindre de chlorure d'argent obtenu en faisant fondre ce composé dans un tube de verre de quelques millimètres de diamètre, le résultat a été le même que celui obtenu dans l'expérience précédente.

Cette cémentation électro-chimique est analogue à celle que M. d'Arcet a eu l'occasion d'observer, il y a un certain nombre d'années, à la Monnaie, dans des circonstances à peu près semblables et dont il ne put se rendre compte. Un barreau d'acier avait été abandonné dans une armoire, à peu de distance d'un flacon renfermant une dissolution de sulfate d'argent et qui avait une fêlure par laquelle filtrait peu à peu la dissolution. Celle-ci, ayant atteint la barre d'acier, a réagi peu à peu sur elle, en vertu d'une action voltaïque lente, et, au

bout de plusieurs années, l'argent s'était tellement bien substitué au fer, que l'on ne trouva plus, à la place du barreau d'acier, qu'un barreau d'argent malléable. M. d'Arcet, de qui l'un de nous tient ces détails, a conservé longtemps cette pièce dans son laboratoire comme un objet de curiosité. Il y a eu cémentation électro-chimique, dans ce cas-ci comme dans les précédents, en raison du contact du fer et de l'argent. La dissolution de sulfate d'argent a dû traverser les pores du dépôt superficiel d'argent pour réagir sur les parties intérieures de la barre d'acier, tandis que le fer était enlevé par une action dirigée en sens inverse; effets analogues à ceux qui ont lieu dans la cémentation du fer pendant sa transformation en acier.

Voici comment on peut interpréter les faits mis en évidence dans les expériences précédentes. Le courant résultant de la réaction de la solution plus ou moins saturée de chlorure de sodium sur le zinc, détermine la décomposition du chlorure de sodium et le transport de la soude et de l'hydrogène ou plutôt du sodium sur le chlorure d'argent qui, bien que mauvais conducteur et insoluble dans l'eau, ainsi que dans une solution étendue de chlorure de sodium, ne doit pas être considéré toutefois comme entièrement dépourvu de conductibilité et de solubilité au contact. Le sodium, à l'état naissant, réagit sur le chlore du chlorure d'argent superficiel; il se forme du chlorure de sodium, et l'argent devenu libre reste sur place, en raison de l'état négatif du chlorure. Le sodium, continuant à arriver, traverse les interstices de la première couche, et va enlever le chlore aux parties du chlorure d'argent qui sont au-dessous; peut-être même le chlore quitte-t-il la molécule avec laquelle il est combiné, pour reprendre celle qui lui est contiguë, et cela de proche en proche, jusqu'à la surface, où il se combine enfin avec le sodium; phénomène, nous le répétons, semblable à la cémentation du fer.

La présence de la soude à l'état naissant ayant dû exercer une grande influence sur le phénomène, en rai-

son de la forte affinité du sodium pour le chlore, on a répété l'expérience avec de l'eau ordinaire : l'action a été plus lente, mais les effets ont été les mêmes.

Les effets de réduction opérés sur des substances regardées comme insolubles, ne sont pas particuliers au chlorure d'argent ; on les obtient encore avec plusieurs composés naturels de ce métal, tels que le sulfure, l'antimonio-sulfure, l'arsénio-sulfure et autres sulfures multiples, avec des différences néanmoins résultant de leur composition.

Avec le sulfure, la décomposition est rapide; l'argent est ramené à l'état métallique ; mais il faudrait une action très-lente et un renouvellement continuel de liquide, pour que les molécules s'agrégeassent, attendu que le sulfure de sodium, formé dans la réaction, tend sans cesse à resulfurer l'argent.

Avec l'antimonio-sulfure, l'argent et l'antimoine sont revivifiés; les deux métaux cristallisent en petits tubercules. L'expérience a été faite soit avec un morceau de minerai de la grosseur d'une noix, soit avec 30 grammes de ce minerai pulvérisé.

Avec l'arsénio-sulfure, non-seulement l'argent et l'arsenic ont été revivifiés, mais il s'est déposé en outre, sur le fil d'argent, du sulfure jaune d'arsenic.

Des minerais plus complexes que les précédents, tels que le cuivre gris, les sulfures multiples, ou plutôt les mélanges de sulfures de zinc, de cuivre, de plomb et d'argent, formant la base des minerais de San-Clemente, du Fresnillo, ont éprouvé également l'action décomposante d'un courant simple, mais beaucoup plus lentement. Le minerai de Guanaxuato, qui est très-pyriteux, ne résiste pas non plus à l'action du courant; le cuivre et l'argent ne tardent pas à apparaître autour du fil.

Enfin la galène argentifère, ou non argentifère, pulvérisée, éprouve, quoique très-lentement, les effets de l'action décomposante du courant. Le plomb est en poussière impalpable, qui se sulfure assez rapidement, par suite de la réaction du sulfure de sodium.

Avant de passer à l'examen des phénomènes analogues qui ont eu lieu dans quelques gîtes métallifères, nous nous arrêterons un instant sur la cémentation électro-chimique.

Il a été démontré, précédemment, que, dans la décomposition électro-chimique du chlorure d'argent en masse, le chlore gazeux traverse les interstices moléculaires qui, dès-lors, doivent avoir des dimensions suffisantes pour laisser passer les parties élémentaires des corps transportées par un courant électrique. Cette propriété a été mise également en évidence par les expériences de Fusinieri; en effet, ce physicien a démontré que, lorsqu'on opère la décharge d'une batterie électrique entre une boule d'or et une boule de métal quelconque, ce dernier est transporté non-seulement sur la surface en regard de la boule d'or, mais encore sur la surface opposée, de sorte qu'il y a transmission du métal au travers de la boule d'or, de même qu'il y a transmission de l'or au travers de l'autre boule de métal. Les faits observés jusqu'ici tendent donc à prouver que les parties élémentaires des corps peuvent acquérir, sous l'influence des forces électriques à forte ou faible tension, la faculté de traverser les masses métalliques.

D'un autre côté, il n'existe pas, dans la terre, de zinc et de fer à l'état métallique, produisant par leur oxydation des courants électriques capables de réagir chimiquement; si donc nous voulons donner une origine électrique à certains phénomènes naturels, il faut chercher d'autres substances très-abondantes dans la plupart des formations terrestres, et dont l'altération, sous l'influence des agents atmosphériques et de l'eau, produit des effets électriques semblables à ceux que l'on obtient avec le zinc. Parmi ces substances, nous prendrons une des plus abondantes, la pyrite ordinaire, ou proto-sulfure de fer, qui se change peu à peu, au contact de l'air et de l'eau, en proto-sulfate.

Pour montrer que le contact d'une pyrite avec une substance non altérable à l'air, est capable de produire

des effets électro-chimiques semblables à ceux précédemment décrits, on a mis dans un bocal une dissolution saturée de sulfate de cuivre, avec une lame de platine ou un morceau de charbon bien recuit, de coke ou d'anthracite; dans la solution plongeait le bec, préparé avec de l'argile, d'un entonnoir contenant une solution très-étendue de carbonate de soude et de chlorure de sodium, où se trouvait un fragment de pyrite qui fut mis en communication avec le platine ou l'anthracite, au moyen d'un fil de platine. La décomposition lente de la pyrite a suffi pour produire un courant capable d'opérer la décomposition du sulfate de cuivre. On obtient un effet semblable en mettant en contact un morceau de pyrite avec un morceau de coke ou autres substances conductrices non altérables, et plongeant la pyrite dans de l'eau légèrement salée, l'autre substance dans une dissolution de sulfate de cuivre, puis séparant les deux liquides avec de l'argile légèrement humide, dans laquelle la pyrite et l'autre substance sont empâtées.

Cette disposition doit se rencontrer fréquemment dans la nature. Si l'on joint encore à ces conditions les réactions résultant de la présence de substances non conductrices de l'électricité, et dont il a été fait précédemment mention, on aura une idée du grand nombre de composés qui peuvent se former naturellement sous l'influence des forces électriques. S'il ne nous est pas toujours possible de les reproduire dans nos appareils, il faut s'en prendre au temps qui nous manque, et qui n'est rien pour la nature. Les faits suivants viennent encore à l'appui de ce qui précède.

A la partie supérieure de certains filons argentifères se trouve un minerai appelé *pacos*, qui est en masses cariées de nature argilo-calcaire, et quelquefois quartzeuse, ayant une couleur plus ou moins brune, et renfermant de l'argent, soit à l'état de chlorure, soit à l'état métallique. Ce minerai porte évidemment l'empreinte de fortes altérations. Sur certains échantillons, l'argent forme des dendrites ou des tubercules cristallins,

dont les parties offrent peu de cohérence. Quand on compare ces échantillons à ceux recouverts de chlorure d'argent, dont on a opéré la décomposition électro-chimique, on est frappé de la ressemblance sous le rapport de l'état moléculaire et de l'aspect ; on est conduit par là à admettre une origine commune dans le mode de formation du dépôt d'argent. Il en est de même à l'égard de lames et de feuilles d'argent qui se trouvent dans des argiles découvertes, il y a quelques années, en Amérique, et de petites masses d'argent adhérant à des roches décomposées, ces lames et ces petites masses pouvant être considérées comme le résultat d'une cémentation électro-chimique. Or, qu'a-t-il fallu à ces minerais pour les amener dans l'état où on les trouve? Des pyrites décomposables, de l'eau renfermant ou ne renfermant pas de chlorure de sodium, et du chlorure ou du sulfure d'argent.

Autre exemple : dans les mines de cuivre du Chili, on trouve du carbonate de cuivre, du protoxyde et du cuivre métallique associés ensemble. Avec du cuivre carbonaté vert mamelonné, de la même localité, et une action chimique lente, on obtient les deux derniers produits.

Dans les pétrifications des corps organisés, l'électricité peut-elle intervenir également, lors même que les corps ne sont pas conducteurs? La conductibilité des masses est inutile dans cette circonstance; il suffit que les surfaces la possèdent pour que l'intervention puisse avoir lieu.

Pour expliquer ces différents effets, on admet que les corps se sont laissé pénétrer par des eaux tenant en dissolution du carbonate de chaux, de la silice et autres composés; puis, qu'ayant éprouvé une décomposition lente dans la terre, leurs molécules ont été remplacées par des molécules de calcaire, de silice, etc. Les phénomènes se passent effectivement ainsi la plupart du temps, mais on peut dans certaines circonstances invoquer l'électricité, d'après ce qui a été dit précédemment.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur les méthodes électro-chimiques à l'aide desquelles on parvient à former des composés analogues à ceux qu'on trouve dans la terre, parce que les développements dans lesquels nous sommes entrés suffisent pour faire connaître l'esprit de ces méthodes, et faire voir en même temps les cas dans lesquels la nature a dû agir d'une manière analogue. Nous ajouterons néanmoins qu'on est parvenu à former, par le concours des affinités et de l'électricité dégagée quand celles-ci s'exercent, des cristaux de quartz, de pyrites, de sulfate et de carbonate de baryte, de soufre, etc., cristaux tellement identiques avec ceux que nous trouvons dans les filons, qu'il n'y a aucun moyen de les distinguer les uns des autres.

CHAPITRE II.

DÉVÉLOPPEMENTS RELATIFS A DIVERS SUJETS TRAITÉS DANS L'OUVRAGE.

§ I. — *De la forme de la terre et de sa densité.*

Nous avons parlé, page 17, de la forme ellipsoïdale de la terre et de son aplatissement aux pôles; nous devons entrer dans quelques détails à ce sujet. Les mesures des arcs de méridiens, et les observations du pendule faites, avec beaucoup de soin, dans différents pays, ont montré que la figure de la terre n'est pas précisément un ellipsoïde de révolution, quoique s'approchant très-près de cette forme; ainsi les mesures prises suivant différents méridiens ne sont pas semblables. Il est probable que la figure de la terre est fort composée, si l'on fait attention à la différence de densité des substances qui recouvrent sa surface et aux inégalités des terrains. Quelle que soit du reste la forme de la terre, qui est à peu près ellipsoïdale, les longueurs des degrés sur un méridien vont en diminuant des pôles à l'équateur. Cette diminution est telle que, près de l'équateur, la longueur d'un degré est de.................... $110582^{\text{mèt.}}$,
et en Suède, vers 66° de latitude...... 111488.
C'est à peu près un kilomètre de différence.

L'aplatissement aux pôles qui résulte des évaluations les plus probables, est de $\frac{1}{306}$ du diamètre équatorial (Puissant, *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. XVI, 1836), et les diamètres de la terre, en supprimant les derniers chiffres significatifs, sont :

Diamètre équatorial	12754000^mèt.	ou	3188^lieues,5.
Diamètre polaire..	12712000	ou	3178 ,0.
Différence.......	42000	ou	10 ,5.

(Voyez Laplace, *Mécanique céleste*, tome II et V.)

La densité moyenne de la terre dont on parlé, page 25, et évaluée à 5,48, ou environ deux fois et demie celle de l'eau, a été obtenue à l'aide d'une méthode mise en usage par Cavendish, et qui consiste à mesurer l'attraction mutuelle de deux corps. Supposons que l'on présente à un fil à plomb une sphère de métal d'un rayon de trois ou quatre mètres, il est bien évident que l'attraction qu'elle exercera sur ce pendule sera si faible, qu'elle ne pourra pas être observée, puisque des masses beaucoup plus considérables, telles qu'une montagne, ne le dévient que de quelques secondes de degré; mais si, au lieu d'un fil à plomb, on se sert d'un levier horizontal parfaitement équilibré et très-mobile, et qu'on présente à l'une de ses extrémités terminée en boule, une sphère métallique, celle-ci tendra à le faire tourner sans qu'on ait à craindre que cette action soit contrariée par la pesanteur comme avec le fil à plomb. On peut doubler l'effet en fixant une seconde boule à l'autre extrémité de ce levier horizontal, et plaçant à peu de distance une autre sphère semblable à la première, de telle sorte que chacune d'elles soit située l'une d'un côté, l'autre de l'autre. En prenant des sphères de métal suffisamment grosses et donnant beaucoup de mobilité au levier, on conçoit qu'on puisse arriver à rendre sensible l'action qu'elles exercent sur les deux petites boules fixées aux extrémités du levier. Le fil qui supporte le levier horizontal est un fil de torsion qui maintient le levier dans une position d'équilibre dépendant de la force de torsion et de l'attraction des sphères.

Pour mesurer cette dernière attraction, il faut chercher la durée des oscillations des petites balles, la longueur du levier et leur distance au centre des grandes sphères où l'on peut supposer toute la masse concentrée; on fait ensuite la correction de la force de torsion.

En comparant ces résultats aux oscillations du pendule sous l'influence de la pesanteur, on en conclut la masse moyenne par rapport à la masse des sphères de plomb. Comme on connaît le volume du globe terrestre, on en déduit sa densité. Nous renvoyons, pour les détails, à la traduction du mémoire de Cavendish, *Journal de l'École polytechnique,* tome X.

L'évaluation de la densité moyenne de la terre a été faite de nouveau il y a quelques années, d'abord par M. Reich en Allemagne, et ensuite par M. Baily en Angleterre; M. Reich trouva 5,44 : c'est à peu près le même nombre que celui de Cavendish; M. Baily (*Annales de physique et de chimie*, 3e série, t. V, p. 338) fit des expériences très-nombreuses et avec des sphères de nature différente, telles que des sphères de plomb, de cuivre, de platine, de zinc, de verre, d'ivoire; il résulte de plus de deux mille déterminations que la moyenne densité de la terre est 5,67 au lieu de 5,48 trouvé par Cavendish. Ces deux résultats ne s'écartent que de $\frac{1}{25}$, mais il est probable que le calcul de M. Baily, 5,67, est plus près de la vérité, par suite des précautions qu'il a prises d'écarter toutes les causes d'erreur.

§ II. — *Mesure des hauteurs par le baromètre.*

Ce problème est plus compliqué qu'il ne paraît au premier abord, car la mesure des hauteurs par le baromètre dépend de la variation de densité de l'air à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère; en outre des causes sans nombre troublent continuellement la température et le degré d'humidité des couches atmosphériques. Cependant, au milieu de ces perturbations, on peut obtenir des résultats assez exacts.

Supposons d'abord que la densité de l'air décroisse régulièrement en s'élevant sur une montagne; soit x la hauteur d'un point A, telle que la hauteur d'un élément B, voisin de A, et situé au-dessus de lui, soit $x + dx$; la pression en B sera $P - dP$, si elle est P en A.

Comme la pression dP est égale au poids d'une co-

lonne d'air ayant pour hauteur AB ou dx, et pour section l'unité, on aura

$$dP = -g\rho dx,$$

g étant l'intensité de la pesanteur en A, et ρ la densité de l'air que l'on suppose constante entre A et B. Or, on a

$$\rho = \frac{\rho_0 . P}{(1 + \alpha t)(0^m,76)},$$

ρ_0 étant la densité de l'air à 0° et $0^m,76$ de pression, et α le coefficient de dilatation de l'air.

On aura donc $dP = -\frac{g\rho_0 P}{(1 + \alpha t)\, 0,^m76} dx.$

En désignant $\frac{g\rho_0}{(1 + \alpha t)\, 0^m,76}$ par K, il viendra $\frac{-dP}{P} = Kdx$,

d'où en intégrant, $-\log P = Kx + C$,

C étant une constante.

Ainsi, en s'élevant sur une montagne, puis mesurant les hauteurs barométriques à diverses stations, les différences entre les hauteurs des stations sont proportionnelles aux différences entre les logarithmes des hauteurs des colonnes barométriques.

Mais avant de donner la formule exacte, nous devons faire plusieurs remarques : la température n'est pas la même aux deux stations, et au lieu de t dans le module de dilatation $(1 + \alpha t)$, il faut mettre $\frac{T + T'}{2}$, ou la moyenne entre les températures des stations T et T'. En outre, il est nécessaire de ramener les colonnes mercurielles à 0° de température. L'air renfermant de la vapeur d'eau, au lieu du coefficient 0,00366, on a trouvé que le nombre 0,004 qui est un peu plus fort, représente assez bien les observations des hauteurs barométriques. Il est nécessaire aussi d'avoir égard à la manière dont varie la pesanteur à mesure que l'on s'élève dans l'air, et par conséquent que l'on s'éloigne du centre de la terre.

En tenant compte de toutes les corrections possibles, et en faisant usage des observations de Ramond, Laplace (*Mécanique céleste*, tome IV) a donné la formule suivante pour mesurer la différence x de hauteur de deux points dont les colonnes barométriques sont h et h' ramenées à 0°.

$$x = 18336^{m}\{1 + 0{,}002845.\cos 2\Psi\}\left\{1 + \frac{2(T+T')}{1000}\right\}$$
$$\left\{\left(1 + \frac{x}{R}\right)\log\frac{h}{h'} + \frac{x}{R}0{,}868589\right\},$$

R étant le rayon de la terre. Comme $\frac{x}{R}$ est toujours très-petit, on peut d'abord calculer une première valeur de x, comme si R était infini; puis remettre cette première valeur dans le second membre de la formule pour calculer la différence de hauteur x.

Le coefficient 18336, trouvé par Ramond, ne répond qu'au parallèle de 45°; pour une latitude Ψ, il faut employer le facteur qui contient 2Ψ, et qui se trouve dans le second membre de l'équation; T et T′ sont les températures aux deux stations.

Afin d'éviter les calculs que présente une formule comme celle que nous avons rapportée, on a formé des tables qui donnent les élévations, lorsqu'on connaît les divers éléments du problème. Une des plus commodes est celle d'Oltmanns. (Voyez *Annuaire du Bureau des longitudes*.) Les voyageurs doivent s'habituer à son usage.

Lorsqu'on a observé le baromètre une fois dans la journée à deux stations différentes d'une montagne, si on calculait la hauteur à l'aide de ces deux observations, on n'aurait pas en général un nombre exact; car les variations horaires et diurnes ne sont pas les mêmes dans les deux stations. Il est donc nécessaire de calculer la hauteur moyenne barométrique dans la journée, afin d'éliminer les variations horaires; si l'on voulait obtenir la hauteur de la montagne avec exactitude, ce ne serait qu'après une série d'observations qu'on arriverait à ce

but. Ramond a trouvé que, si l'on veut s'en tenir à une seule observation, l'heure de midi donne les résultats qui s'écartent le moins de la vérité.

§ III. — *De la résistance de l'eau et de l'air.*

De l'eau. — La question de la résistance des fluides est une des plus complexes de la mécanique, et, dans l'état actuel de la science, elle n'est nullement résolue que dans des cas très-particuliers. Tous les mécaniciens qui se sont occupés de cette question se sont accordés pour admettre que la résistance des fluides sur la surface S d'un corps en mouvement est proportionnelle au carré de la vitesse, en supposant que ce fluide soit sans viscosité, qu'il n'y ait pas d'action latérale, et que le corps se meuve perpendiculairement à la surface S; alors, pour une vitesse V par seconde, on a admis la formule

$$(a)\ R = SV^2\frac{P}{g},$$

R étant la résistance, P le poids de l'unité de volume du fluide, et g l'intensité de la pesanteur. Pour l'eau, on aurait, sur une surface de 1 mètre carré, se mouvant avec une vitesse de 1 mètre par seconde,

$$R = 102^{\text{kilog.}}.$$

Newton, en cherchant par expérience à calculer cette résistance, a, le premier, trouvé un nombre qui n'est que la moitié du précédent; Borda (*Mém. de l'Ac. des sciences*, 1763) est arrivé à une conclusion à peu près analogue et a donné pour la vitesse de 1 mètre par seconde,

$$R = 52^{\text{kilog.}},8.$$

Si l'on admet ce nombre comme limite inférieure, on peut calculer approximativement l'action des vagues ou des cours d'eau sur des pierres ou des corps soumis à leur influence. Supposons que l'eau en mouvement agisse sur une sphère d'un rayon r, la densité de la matière étant d; supposons en outre que la résistance ne se

fasse sentir que sur la section πr^2 d'un grand cercle de cette sphère, alors la résistance sera, pour une vitesse V, $\pi r^2 V^2 R$; le poids du corps dans l'eau est $\frac{4}{3}\pi r^3(d-1)$, et pour que la résistance fût capable d'entraîner le corps, il serait nécessaire que

$$\pi r^2 V^2 R = \frac{4}{3}\pi r^3 (d-1), \text{ c'est-à-dire } V^2 R = \frac{4}{3} r(d-1).$$

On voit que V dépend de r, et que si r est très-petit, V sera aussi fort petit; un faible courant d'eau pourra donc charrier des poussières très-petites. Dans le cas que nous considérons, en prenant le centimètre pour unité, et 2,7 pour densité des matières solides, on a

$$5^{\text{gr.}},28\left(\frac{V}{100}\right)^2 = \frac{4}{3} r(d-1), \text{ ou bien } \frac{V}{100} = 0{,}46\sqrt{\frac{1}{2}r}.$$

C'est par cette formule qu'ont été calculés les nombres de la page 286.

Pour que l'eau déplaçât des rochers de granit de 2 mètres de diamètre, il faudrait que sa vitesse fût portée à plus de 9 mètres par seconde.

De l'air. — La formule (a), appliquée à l'air, donnerait théoriquement sur une surface de 1 mètre carré avec une vitesse de 1 mètre par seconde,

$$R = 0^{\text{kil.}},132.$$

Borda, dans le mémoire cité plus haut, a trouvé que les nombres qui expriment la résistance sur une surface plane n'augmentent pas proportionnellement à cette surface; il y a donc des effets latéraux qui altèrent la valeur de la résistance; cette valeur, malgré cela, s'approche du nombre 0,12, à mesure que les surfaces deviennent plus grandes. On peut donc admettre approximativement $0^{\text{kil.}},125$ pour l'action d'un vent ayant une vitesse de 1 mètre par seconde sur 1 mètre carré de surface; c'est un demi-kilogramme sur 4 mètres carrés. La formule qui donne la valeur de la résistance pour une autre vitesse V et pour une surface S serait donc

$$R = 0^{\text{kil.}},125\, V^2 S.$$

§ IV. — *Explication du phénomène des couronnes.*

On sait que si un point lumineux est situé en L (pl. I, fig. 17) et un observateur en O, en considérant l'onde lumineuse dans une de ses phases quelconques N′ MN, l'action lumineuse en O peut être regardée comme la résultante de la somme des actions de l'onde entière MN. Or, si l'on considère des points très-rapprochés de M, *a*, *b*, *c*, etc., tels que $bO - aO = \frac{1}{2} d$, $cO - bO = \frac{1}{2} d$, etc...; *d* étant l'intervalle fondamental des interférences ou la longueur d'ondulation pour une lumière quelconque, les arcs *ba* et *bc* se détruiront totalement; ainsi, puisque $cO - aO = d$, l'arc *ac* n'enverra aucune impression lumineuse et sera dans le même état que si un corps opaque était mis à sa place; il en sera de même des arcs compris entre *c* et *n*, et entre *a′* et *n′*. Il résulte de là que de chaque côté de M, à droite et à gauche, les parties voisines seules donnent à *o* la sensation lumineuse, et les autres portions de l'onde se détruisent complétement.

Supposons qu'à la place de *ab* on mette un corps opaque : *bc* ne sera plus détruit et aura tout son effet; on recevra donc dans la direction de O*b* ou O*c* l'impression lumineuse des rayons dont l'intervalle fondamental ou la longueur d'ondulation est *d*. Ainsi, des portions *a*N et *a′*N′ de l'onde MN qui étaient inefficaces pour l'observateur O, deviennent la source d'impressions lumineuses, alors qu'un corps d'un très-petit diamètre vient intercepter une des parties, telle que *ab*, qui détruisait l'action d'une autre portion telle que *bc*.

On peut concevoir d'après cela que si des globules, des poussières ou des corps d'un très-petit diamètre flottent dans l'air entre un objet lumineux L et l'œil d'un observateur O (pl. I, fig. 18), si l'on représente par *ab* le diamètre *r* de ces globules, et que l'on s'éloigne sur la ligne LO à partir de M, où l'on suppose ces globules situés, lorsqu'on sera parvenu à une posi-

tion telle que $bO - aO = \frac{1}{2} d$, on aura, suivant Oa, le maximum d'intensité de la couleur dont la longueur d'onde est d.

En décrivant l'arc ap avec Oa comme rayon, ap sera sensiblement perpendiculaire sur bo, et l'angle $bap = \mathrm{MO}b = \alpha$. Donc $bp = ab \sin \alpha$, ou

$$\frac{1}{2} d = r \sin \alpha,$$

c'est-à-dire $$d = 2r . \sin \alpha.$$

On peut exprimer ainsi ce résultat :

L'intervalle fondamental des interférences est égal au produit du diamètre du globule par deux fois le sinus de la distance angulaire entre la direction de la lumière directe et celle de la lumière envoyée par le globule.

On voit donc que l'on pourra employer cette méthode pour trouver les diamètres des vésicules des nuages. M. Babinet rend compte, par les mêmes principes, comme on l'a déjà dit page 449, pourquoi lorsque le soleil se lève derrière une colline couverte d'arbres et de broussailles, le spectateur, dans l'ombre de la colline et près des rayons solaires qui vont bientôt l'atteindre, voit toutes les petites branches projetées sur le ciel, non pas opaques et noircies, mais au contraire blanches et argentées. Ces petites branches jouent le même rôle que les globules de vapeur dans le phénomène des couronnes; sans leur présence, les ondes lumineuses passeraient inefficaces pour l'observateur par-dessus la colline, et les obstacles opaques deviennent autant de parties lumineuses qui renvoient vers l'observateur l'image en clair des obstacles noirs et opaques. (*Comptes rendus*, tome IV, page 638.)

FIN.

ERRATA.

Page 55, ligne 35, jusqu'à 6 mètres de largeur, *lisez* jusqu'à 3 mètres de largeur.

Page 112, ligne 8, davantage, *lisez* plus.

Page 129, ligne 3, Section Ire, *lisez* Section Ire : *Des révolutions du globe.*

Page 161, ligne 34, et de la terre, *lisez* et de la lune.

Page 163, ligne 30, Section II, *lisez* Section II. *Des climats.*

Page 177, ligne 36, *émissifs et rayonnants*, lisez *émissifs et réflecteurs.*

Page 192, ligne 24, ces trois divisions, *lisez* ces divisions.

Page 199, ligne 16, Cours d'agriculture de M. de Gasparin, *lisez* Cours d'agriculture de M. de Gasparin, tome 2.

Page 200, ligne 25, tous les 14 ans, *lisez* tous les 14 ans, en France.

Page 232, ligne 14, ils perdent, *lisez* les animaux perdent.

Page 290, ligne 3, Section I, *lisez* Section I. *Étendue et composition.*

Page 334, ligne 35, sensiblement semblables, *lisez* sensiblement les mêmes.

Page 341, ligne 18, *exposée du système du monde*, lisez *exposition du système du monde.*

Page 579, ligne 23, des masses, *lisez* de masses.

TABLE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS CE VOLUME.

CHAPITRE III.

DES MERS.

SECTION I.

DE L'ÉTENDUE DES MERS ET DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES EAUX.

SECTION II.

DU MOUVEMENT DES EAUX A LA SURFACE DU SOL.

CHAPITRE IV.

DE L'ATMOSPHÈRE.

SECTION I.

ÉTENDUE ET COMPOSITION DE L'ATMOSPHÈRE.

SECTION II.

DES VENTS.

SECTION III.

DES VARIATIONS BAROMÉTRIQUES.

SECTION IV.

CAUSE DES VENTS ET DES VARIATIONS BAROMÉTRIQUES.

SECTION V.

DE L'HYGROMÉTRIE.

—

CHAPITRE V.

OPTIQUE MÉTÉOROLOGIQUE.

SECTION I.

COULEUR DE L'AIR, TRANSPARENCE DE L'ATMOSPHÈRE ET COULEUR DES ASTRES.

SECTION II.

AURORE ET CRÉPUSCULE.

SECTION III.

RÉFRACTION.

SECTION IV.

DIFFRACTION ET POLARISATION.

CHAPITRE VI.

DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

SECTION I.

DE L'ÉTAT ÉLECTRIQUE DE LA TERRE ET DE L'ATMOSPHÈRE.

SECTION II.

DE L'ÉLECTRICITÉ DES NUAGES ET DE LA FORMATION DES ORAGES.

SECTION II.

DE L'ORIGINE DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

—

CHAPITRE VIII.

DES PHÉNOMÈNES MÉTÉORIQUES DONT L'ORIGINE EST INCERTAINE.

SECTION I.

DE L'AURORE POLAIRE.

SECTION II.

DES ÉTOILES FILANTES, DES BOLIDES ET DES AÉROLITHES.

SECTION III.

BROUILLARDS SECS ET PLUIES EXTRAORDINAIRES.

—

APPENDICE.

—

CHAPITRE PREMIER.

DE L'ALTÉRATION DES ROCHES SOUS LES INFLUENCES ATMOSPHÉRIQUES.

SECTION I.

DE L'ALTÉRATION DES ROCHES.

SECTION II.

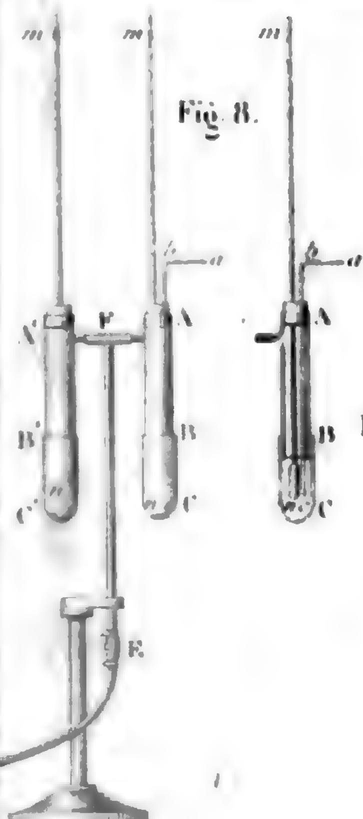
DE LA REPRODUCTION DES PHÉNOMÈNES DE DÉCOMPOSITION ET DE RECOMPOSITION TERRESTRE.

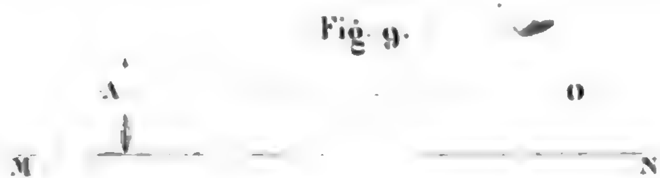
CHAPITRE II.

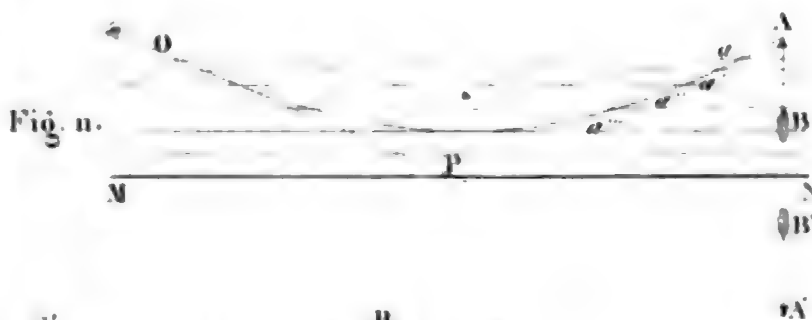
DÉVELOPPEMENTS RELATIFS A DIVERS SUJETS TRAITÉS DANS L'OUVRAGE.

FIN DE LA TABLE.

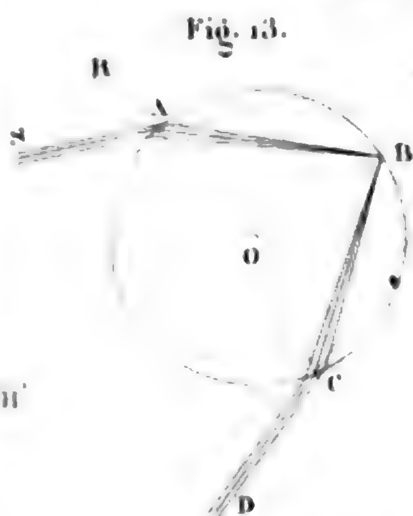


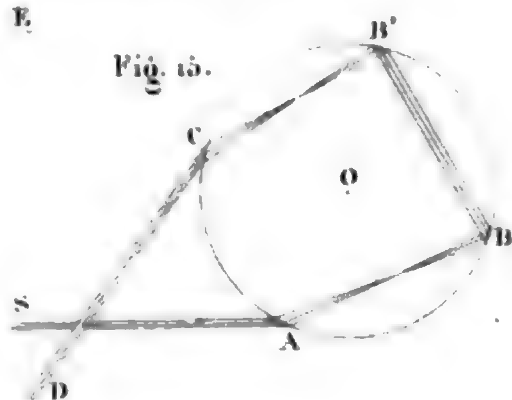

Fig. 8.
m
m
m
a
a
A'
F
A
A
B'
B
B
C'
C
C
E

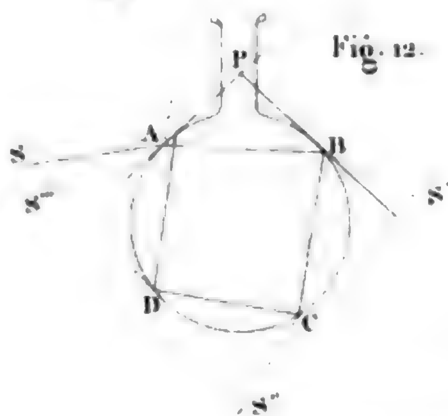

Fig. 9.
A'
O
M
N

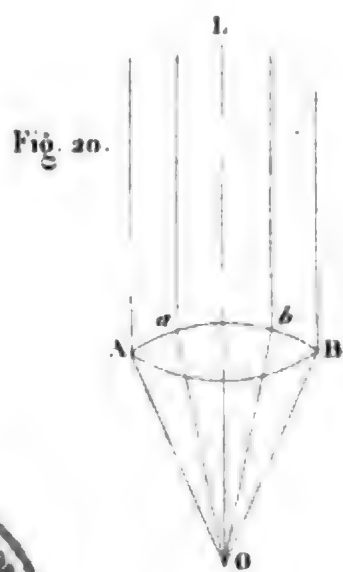

Fig. 11.
O
A
B
P
M
N
B'
A'


S'
R
Fig. 14.
V
S
O
P
E


Fig. 13.
R
S
A
B
O
C
D


Fig. 15.
B'
C
O
B
S
A
D

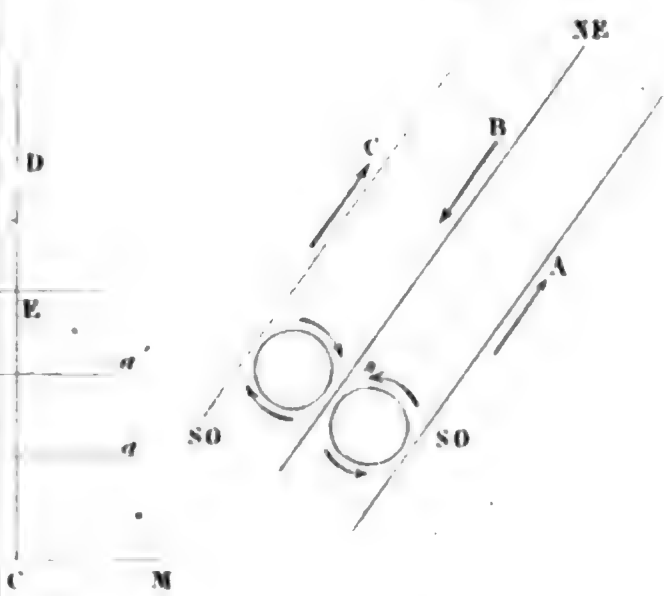

Fig. 12.
P
S
A
B
S'
D
C

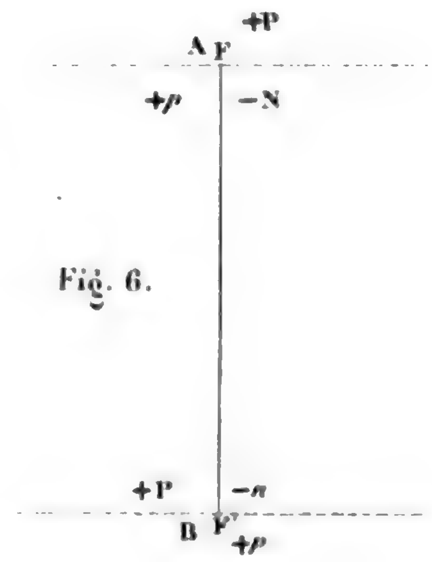

L
Fig. 20.
a
b
A
B
O

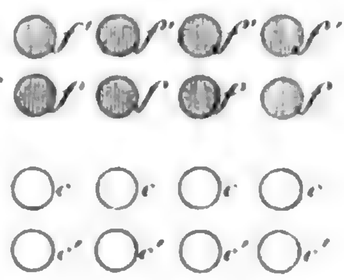
Dulos sc

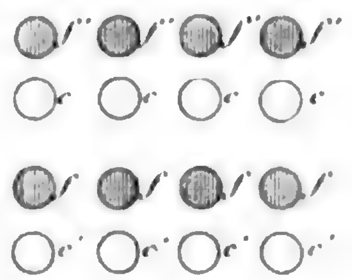
Pl.











Dulos sculp

Fig. (2) PERIODE JURASSIQUE.

Edimbourg
blin
Copenhague
Londres
Bristol
Berlin
Cherbourg
Brest
Metz
Paris
Strasbourg
Ratisbonne
Nantes
Nevers
Vienne
Clermont
Lyon
Rhodez
Nice
Toulon
Lisbonne
B

Dulos sc.

Fig (1) PÉRIODE CRÉTACÉE.

Edimbourg
Londres
Bruxelles
Berlin
Varsovie
Dresde
Cherbourg
Prague
Cracovie
Paris
Metz
Strasbourg
Vienne
Poitiers
Nevers
Munich
Lyon
Rodez
Milan

Dulos sc



RFACE DES MERS.

..a en 1838. -15° -10° **PL. V.**

100 80 60 40 20 00

RIONALE

AFRIQUE

AMÉRIQUE MÉRIDIONALE

Equateur de chaleur

28°

Équateur

Ligne des maxima

100 80 60 40 20 00

Dulos sc.





Nimbus



Fig. 21

Dessiné par V. Ro

Gravé par Paul Legra



LOBE TERRESTRE.

EY Capᵉ de Frégate. Planche VIII.

GROENLAND

Islande

AMÉRIQUE

MÉRIDIONALE

Bermudes

Açores

Guyane

Bahia

Lima

Valparaiso

Cap de Bonne Espérance

I. Malouines

T. des Sandwich

Sherritsland

I. Alexandre I.

Gravé par Adam.



Planche IX

AFRIQUE

Gravé par Adam



LOI

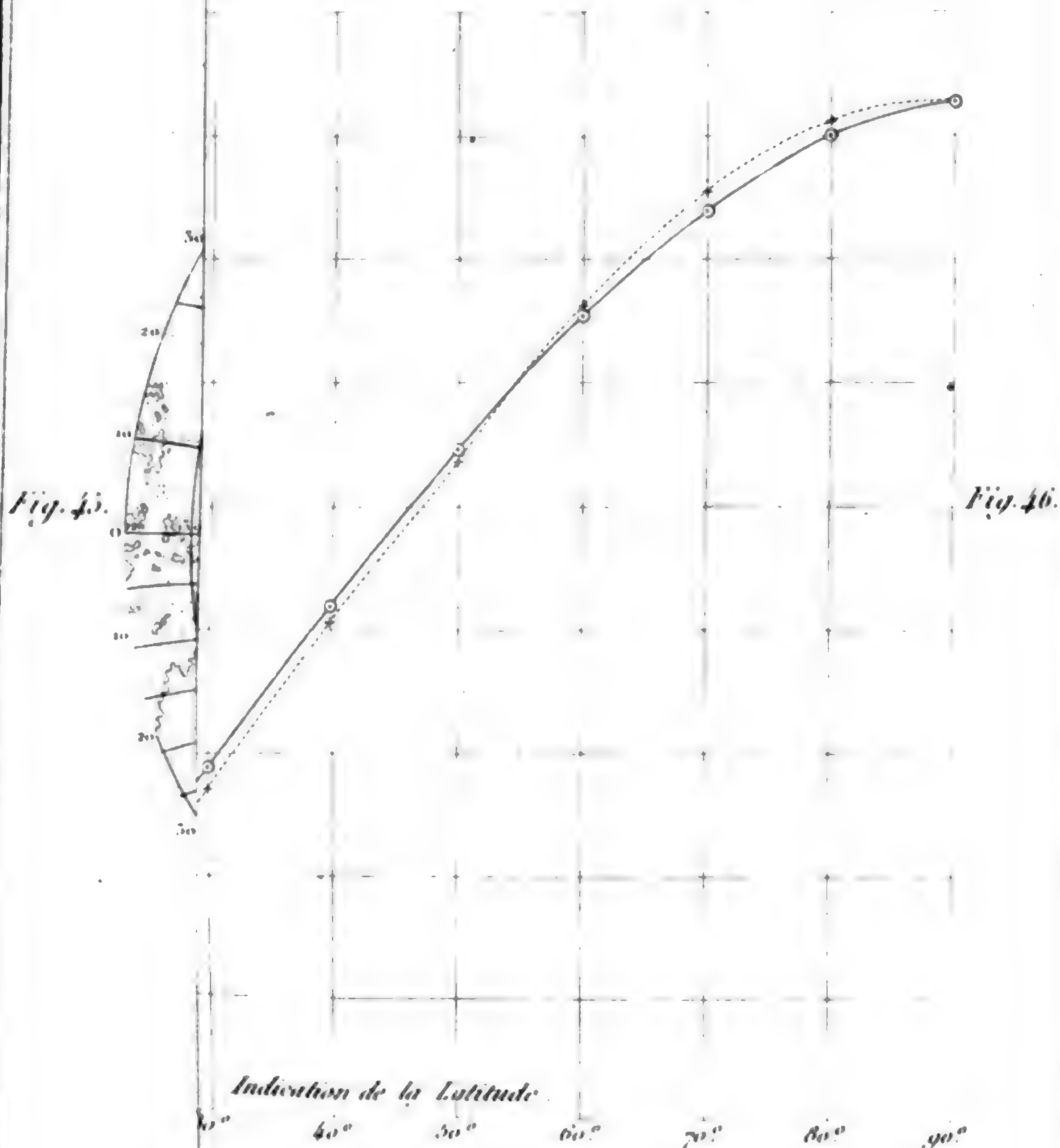
ON DE L'INTENSITÉ MAGNÉTIQUE

'ÉQUATEUR AUX PÔLES

TERRESTRES.

rès les observations faites depuis 1700, jusqu'en 1830

rès la formule de M.r Biot. $i = \sqrt{a + b \sin.^2 \lambda}$



ES.

publiée à Gotha en 1838

Planche XI.

Pole de l'Equateur Magnétique moyen

GROENLAND

Spitzberg

Island

AMÉRIQUE

SEPTENTRIONALE

AFRIQUE

AMÉRIQUE MÉRIDIONALE

Ligne Equinoxiale

Gravé par Adam

27 | Due | 1828 | 1830
28 | Erman | 1828 | 1830.
29 | Kupffer | | 1829


EUROPE
PERSE
CHINE
ARABIE
AFRIQUE
Paris
Madrid
Inclinaison
Ligne
Ste Helene
Madagascar

Planche XL

Dessiné par M

Gravé par Paul Legra



Planche V

Fig 23

Fig 24



Dessiné par M Bran

Gravé par Paul Le



